



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY**

**A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**ANALÝZA INOVOVANÉHO JADERNÉHO PALIVA  
PROGRAMEM FEMAXI**

ANALYSIS OF THE INNOVATED NUCLEAR FUEL WITH FEMAXI CODE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Ondřej Čásar

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Štěpán Foral

**BRNO 2017**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** Ondřej Čásar

**ID:** 173629

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2016/17

## NÁZEV TÉMATU:

### **Analýza inovovaného jaderného paliva programem FEMAXI**

#### **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Palivo pro lehkovodní reaktory - popis předního palivového cyklus, vč. chování paliva v průběhu vyhořívání
2. Paliva se zvýšenou tepelnou vodivostí - motivace pro jejich vývoj, možné způsoby zvyšování jejich tepelné vodivosti
3. Výpočetní program FEMAXI - struktura programu, způsob implementace nových modelů (kompilace programu), tvorba vstupního souboru
4. Volba referenčního palivového souboru a modelové výpočty s modely popisující inovované palivo
5. Analýza výsledků s ohledem na porovnání pokročilého jaderného paliva s klasickým

#### **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 5.6.2017

**Vedoucí práce:** Ing. Štěpán Foral

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

#### **UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

ČÁŠAR, O. *Analýza inovovaného jaderného paliva programem FEMAXI*. Bakalářská práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2017. 78 stran.

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Analýza inovovaného jaderného paliva programem FEMAXI* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 21.05.2017

.....

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá úpravou zdrojového kódu programu FEMAXI 6 a následnou analýzou kompozitního jaderného paliva založeného na příměsi SiC. Prvotně je v práci představen celý otevřený palivový cyklus, od zahájení těžby po konečné uložení jaderného odpadu. Následující část popisuje fyzikální děje v palivu, především děje spojené s nízkou tepelnou vodivostí klasických keramických pelet z oxidu uraničitého, dále následuje popis výpočtu teploty v peletě a rozbor součinitele tepelné vodivosti, včetně vlivů ovlivňujících jeho velikost. Součástí práce je i rozbor vybraných kompozitních paliv zvyšujících tepelnou vodivost a představení výpočetního programu pro analýzu jaderného paliva FEMAXI 6, včetně jeho struktury, implementace rovnic a popisu vstupního souboru. V praktické části pak lze nalézt popis provedených úprav programu, srovnání s dalšími výpočetními programy a analýzu možného kompozitního paliva pro JE Dukovany.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** VVER; jaderné palivo; palivový cyklus; fyzikální děje v palivu; zvyšování tepelné vodivosti; kompozitní paliva; FEMAXI 6; analýza jaderného paliva

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with modification of source code of program FEMAXI 6 and subsequent analysis of composite nuclear fuel based on SiC admixture. First part introduces the entire open fuel cycle, from the start of the mining to the final disposal of the nuclear waste. The following part describes physical processes in the fuel, especially the processes associated with the low thermal conductivity of classical uranium oxide ceramic pellets, contains the description of the temperature calculations in the pellet and the analysis of the thermal conductivity coefficient including the influences affecting its size. One part of the thesis is an analysis of selected composite fuels increasing the thermal conductivity and introduction of a computational program for FEMAXI 6 nuclear fuel analysis, including its structure, implementation of equations and description of the input file. In the practical part, one can find a description of performed program modifications, comparison with other computational programs and analysis of possible composite nuclear fuel for Dukovany NPP.

## **KEY WORDS:**

nuclear fuel; nuclear fuel cycle; physical processes in the fuel; thermal conductivity increasing; composite fuels; FEMAXI 6; analysis of nuclear fuel

## OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK .....	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD .....	15
2 PALIVOVÝ CYKLUS.....	16
2.1 TĚŽBA A ÚPRAVA URANOVÉ RUDY .....	16
2.2 OBOHACOVÁNÍ URANU .....	17
2.2.1 PLYNNÁ DIFUZE .....	17
2.2.2 METODA VYUŽÍVAJÍCÍ ODSŘEDIVÝCH SIL .....	18
2.2.3 LASEROVÁ SEPARACE .....	18
2.3 VÝROBA PALIVOVÝCH PELET.....	19
2.4 PALIVOVÁ KAZETA VVER 440.....	20
2.4.1 PALIVOVÝ PROUTEK .....	21
2.4.2 KONSTRUKCE PALIVOVÉ KAZETY VVER 440 .....	22
2.4.3 KONSTRUKCE REGULAČNÍ KAZETY VVER 440.....	23
2.5 ZAVÁŽENÍ A VÝMĚNA PALIVA V REAKTORU .....	24
2.6 SKLADOVÁNÍ POUŽITÉHO PALIVA .....	25
2.6.1 MEZISKLAD.....	25
2.6.2 HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ.....	26
3 FYZIKÁLNÍ PROCESY PŘI VYHOŘÍVÁNÍ PALIVA .....	28
3.1 ZMĚNA STRUKTURY PALIVA.....	28
3.2 PRODUKTY ŠTĚPENÍ.....	28
3.3 NAPUCHÁNÍ PELETY.....	30
3.4 PRASKÁNÍ A PŘEHŘÍVÁNÍ PELETY.....	30
3.5 PŘENOS TEPLA V PELETÁCH .....	32
3.6 SOUČINITELE TEPELNÉ VODIVOSTI $UO_2$ .....	34
3.6.1 FONONOVÁ VODIVOST .....	34
3.6.2 RADIAČNÍ VODIVOST .....	35
3.6.3 ELEKTRONOVÁ VODIVOST .....	35
3.6.4 STANOVENÍ SOUČINITELE TEPELNÉ VODIVOSTI $\lambda_{UO_2}$ .....	36
3.7 ZÁVISLOST SOUČINITELE TEPELNÉ VODIVOSTI NA POROZITĚ .....	36
3.8 VLIV OZÁŘENÍ A VYHOŘENÍ PALIVA NA SOUČINITELE TEPELNÉ VODIVOSTI .....	38
4 ZPŮSOBY ZVYŠOVÁNÍ SOUČINITELE TEPELNÉ VODIVOSTI PELET .....	39
4.1 KOMPOZITNÍ PALIVO $UO_2$ -UN.....	39
4.2 KOMPOZITNÍ PALIVO $UO_2$ -BeO.....	40
4.3 KOMPOZITNÍ PALIVO $UO_2$ -SiC .....	41
4.4 KOMPOZITNÍ PALIVO $UO_2$ -DIAMANT.....	44

---

<b>5 PROGRAM FEMAXI 6.....</b>	<b>47</b>
<b>5.1 STRUKTURA PROGRAMU FEMAXI 6.....</b>	<b>47</b>
<b>5.2 VSTUPNÍ SOUBOR .....</b>	<b>49</b>
<b>5.3 IMPLEMENTACE NOVÝCH MODELŮ .....</b>	<b>52</b>
<b>6 PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>53</b>
<b>6.1 ROVNICE POPISUJÍCÍ MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI KOMPOZITU.....</b>	<b>53</b>
<b>6.2 ROVNICE MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ PRO DATA JE DUKOVANY .....</b>	<b>54</b>
6.2.1 VLASTNOSTI $\text{UO}_2$ .....	55
6.2.2 VLASTNOSTI SiC.....	57
<b>6.3 VSTUPNÍ SOUBOR FEMAXI 6 MODELUJÍCÍ PALIVOVÝ PROUTEK URČENÝ KE SROVNÁNÍ</b> <b>VÝSLEDKŮ JEDNOTLIVÝCH VÝPOČETNÍCH PROGRAMŮ .....</b>	<b>59</b>
<b>6.4 SROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH VÝPOČETNÍCH PROGRAMŮ .....</b>	<b>61</b>
<b>6.5 SROVNÁNÍ FEMAXI 6 S PROGRAMEM CAMPUS V ANALÝZE VLIVU OBSAHU SiC .....</b>	<b>63</b>
<b>6.6 VSTUPNÍ SOUBOR PROGRAMU FEMAXI 6 S DATY PRO JE DUKOVANY.....</b>	<b>65</b>
<b>6.7 ANALÝZA MOŽNÉHO KOMPOZITNÍHO PALIVA PROVOZOVATELNÉHO V JE DUKOVANY.....</b>	<b>69</b>
<b>7 ZÁVĚR.....</b>	<b>73</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>75</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Uranová ruda [34] .....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 2-2 Uranový prášek ve formě žlutého koláče [35].....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 2-3 Princip plynné difuze [36] .....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2-4 Princip obohacování uranu v centrifugách [37] .....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2-5 Princip AVLIS metody obohacování uranu [8] .....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 2-6 Palivová peleta [38] .....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 2-7 Schématické naznačení suché metody přeměny UF<sub>6</sub> na UO<sub>2</sub> [18].....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 2-8 Řez palivovým proutkem VVER 440 [14] .....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 2-9 Řez palivovou kazetou VVER 440 [14].....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 2-10 Řez regulační kazetou VVER 440. Vlevo palivová část, vpravo absorpční část. [14] ..</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 2-11 Zavážecí stroj Jaderné elektrárny Dukovany [39] .....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 2-12 Mokrý mezisklad La Hague ve Francii [40] .....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 2-13 Suchý mezisklad JE Dukovany s kontejnery CASTOR [41] .....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 2-14 Koncepce hlubinného úložiště v ČR [42] .....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 3-1 Procentní výtěžnost na 1 štěpení <sup>235</sup>U, <sup>239</sup>Pu a <sup>233</sup>U [20] .....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 3-2 Pnutí v peletě způsobené tepelným spádem [18] .....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 3-3 Radiální rozložení teploty v peletě [18] .....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 3-4 Praskání pelety, změna jejího tvaru a vytváření hřebenů v palivovém proutku [43] .....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 3-5 Objemový vývin tepla po poloměru pelety na začátku a na konci kampaně pro tlakovodní reaktory [18] .....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 3-6 Závislost součinitele tepelné vodivosti UO<sub>2</sub> na teplotě zahrnující Fononovou a Elektronovou vodivost [18] .....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 3-7 Změna součinitele tepelné vodivosti UO<sub>2</sub> vlivem porozity [18] .....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 3-8 Vliv vyhoření a ozáření na λ pro palivo UO<sub>2</sub> při vyhoření 60 GWd/tU [18] .....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 4-1 Součinitel tepelné vodivosti jednotlivých vzorků a materiálů v závislosti na teplotě [23] .....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 4-2 Součinitel tepelné vodivosti UO<sub>2</sub>-BeO při různém % obsahu BeO [27] .....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 4-3 Ukázka tvaru částic SiC - nalevo vlákna, napravo prachové částičky [30] .....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 4-4 Závislost součinitele tepelné vodivosti na teplotě a pro různé teploty slinování [30] ....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 4-5 Součinitel tepelné vodivosti UO<sub>2</sub>-SiC v závislosti na % objemu SiC [31] .....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 4-6 Teoretická hustota kompozitního paliva v závislosti na teplotě slinování a velikosti částic diamantu [32].....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 4-7 Vliv velikosti částic diamantu na vodivost kompozitního paliva [32] .....</i>	<i>45</i>



<i>Obr. 4-8 Porovnání tepelné vodivosti jednotlivých kompozitních paliv s podobným % zastoupením [32] .....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 5-1 Struktura programu FEMAXI 6 [33] .....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 5-2 Ukázkový vstupní soubor programu FEMAXI 6 [33] .....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 5-3 Ukázka implementace rovnic do zdrojového kódu FEMAXI 6 .....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 6-1 Palivový proutek modelovaný výpočetními programy [31] .....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 6-2 Závislost teploty středu a povrchu pelety na vyhoření .....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 6-3 Šířka mezery mezi peletou a pokrytím v závislosti na vyhoření .....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 6-4 Uvolnění plynných produktů štěpení v závislosti na vyhoření .....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 6-5 Tlak plynné výplně proutku v závislosti na vyhoření .....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 6-6 Závislost teplot pelety na objemu příměsi SiC a na vyhoření .....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 6-7 Šířka mezery mezi palivem a pokrytím v závislosti na objemu příměsi a vyhoření .....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 6-8 Uvolňování plynných produktů štěpení v závislosti na objemu příměsi SiC a vyhoření .....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 6-9 Tlak plynné výplně palivového proutku v závislosti na objemu příměsi SiC a vyhoření .....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 6-10 Uspořádání palivové kazety paliva Gd-2M s vyznačeným modelovaným proutkem [51] .....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 6-11 Relativní hodnoty poproutkového výkonu jednotlivých segmentů v průběhu vyhořívání .....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 6-12 Vývoj průměrné hodnoty poproutkového výkonu palivového proutku v čase .....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 6-13 Vývoj průměrné hodnoty poproutkového výkonu palivového proutku v závislosti na procentním podílu příměsi SiC a vyhoření .....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 6-14 Závislost teplot pelety na objemu příměsi SiC a čase .....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 6-15 Závislost teplot pelety na objemu příměsi SiC a na vyhoření .....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 6-16 Šířka mezery mezi palivem a pokrytím v závislosti na objemu příměsi a čase .....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 6-17 Šířka mezery mezi palivem a pokrytím v závislosti na objemu příměsi a vyhoření .....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 6-18 Uvolňování plynných produktů štěpení v závislosti na objemu příměsi SiC a čase .....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 6-19 Uvolňování plynných produktů štěpení v závislosti na objemu příměsi SiC a vyhoření .....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 6-20 Tlak plynné výplně palivového proutku v závislosti na objemu příměsi SiC a čase .....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 6-21 Tlak plynné výplně palivového proutku v závislosti na objemu příměsi SiC a vyhoření .....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 6-22 Závislost vyhoření paliva na čase a podílu příměsi SiC .....</i>	<i>72</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 5-1 Rozdělení oblasti analýzy programu FEMAXI 6 [33] .....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 6-1 Specifikace pelety, palivového proutku a dalších nastavení pro vstupní soubor programu FEMAXI 6 dle informací uvedených v [31] .....</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 6-2 Specifikace pelety, palivového proutku a dalších nastavení paliva Gd-2M [48] .....</i>	<i>65</i>

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

ABAQUS	- výpočetní program založený na metodě konečných prvků
ADTT	- Accelerator-Driven Transmutation Technology - urychlovačem řízená transmutace
AVLIS	- Atomic Vapor Laser Isotope Separation - laserová separace izotopů prvku z proudu par
BISON	- výpočetní program pro analýzu jaderného paliva
CANDU	- CANada Deuterium-Uranium - kanadský energetický reaktor moderovaný a chlazený těžkou vodou
CAMPUS	- výpočetní program pro analýzu jaderného paliva
DFC	- Differential scanning calorimetry - diferenční skenovací kalorimetrie
FEM	- Finite Element Method - metoda konečných prvků
FEMAXI	- výpočetní program pro analýzu jaderného paliva
FRAPCON	- výpočetní program pro analýzu jaderného paliva
IR	- Infra Red radiation - infračervené záření
JAEA	- Japan Atomic Energy Agency - japonská agentura pro atomovou energii
JE	- Jaderná Elektrárna
MLIS	- Molecular Laser Isotope Separation - Laserová separace izotopů prvku vázaných v molekule
MOBYDICK	- program pro výpočet vsázek jaderného paliva
SPS	- Spark Plasma Sintering - slinování pomocí plasmy (jisker)
VVER	- Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor - energetický reaktor chlazený a moderovaný vodou
WIPP	- Waste Isolation Pilot Plant - americký projekt geologického úložiště radioaktivního odpadu

$a$	- poloměr částice	[m]
Bu	- vyhoření	[MWd/tU]
$c_p$	- měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$c_{pf}$	- měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$c_v$	- měrná tepelná kapacita při konstantním objemu	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$d_{ci}$	- vnitřní průměr pokrytí	[m]
$d_{co}$	- vnější průměr pokrytí	[m]
$d_{pel}$	- průměr pelety	[m]
DPA	- průměrný počet posuvů atomů pod vlivem srážek s neutrony při ozařování	[-]
$e$	- elementární elektrický náboj $e = 1,602177 \cdot 10^{-19}$ C	[C]
E	- Yongův modul pružnosti v tahu	[Pa]
$E_D$	- aktivační energie potřebná pro vznik Frenkelových poruch	[J.mol <sup>-1</sup> ]
EFPY	- efektivní výkon při plném ročním provozu	[MWd/tU]
$h$	- koncentrace děr	[m <sup>-3</sup> ]
$h_{zks}$	- hloubka zkosení	[m]
$h_c$	- měrná tepelná vodivost rozhraní částice-matrice	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$h_{pel}$	- výška pelety	[m]
I	- entalpie	[J.kg <sup>-1</sup> ]
$l$	- střední volná dráha fononu	[m]
$\Delta L/L$	- měrná tepelná roztažnost	[K <sup>-1</sup> ]
$l_c$	- tloušťka pokrytí	[m]
$l_{mez}$	- šířka počáteční mezery mezi palivem a pokrytím	[m]
$l_{pal. sl}$	- výška palivového sloupce	[m]
$l_{seg}$	- délka axiálního segmentu	[m]
$l_{up}$	- vzdálenost od konce palivového sloupce k horní uzávěrce	[m]
$n$	- koncentrace neutronů	[m <sup>-3</sup> ]
	- počet segmentů	[-]
$N_u$	- počet uranových iontů na jednotku objemu	[-]
O/M	- stechiometrický poměr kyslíku a uranu	[-]
P	- porozita	[m <sup>-3</sup> ]
$q_v$	- měrný objemový tepelný výkon	[W.m <sup>-3</sup> ]
$q_h$	- měrný lineární tepelný výkon	[W.m <sup>-1</sup> ]

$Q_m$	- hmotnostní průtok	$[\text{kg.s}^{-1}]$
$r$	- vzdálenost od středu	$[\text{m}]$
$r_o$	- poloměr centrálního otvoru	$[\text{m}]$
$r_u$	- poloměr pelety	$[\text{m}]$
$R$	- univerzální plynová konstanta	$[\text{J.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$
	- součinitel vyjadřující degradaci měrné tepelné vodivosti pod vlivem neutronového ozáření	$[\text{m.K.W}^{-1}]$
	- poměr délky horního prostoru mezi koncem palivového sloupce a horní uzávěrkou ku délce palivového sloupce	$[-]$
$S$	- plocha	$[\text{m}^2]$
$th$	- teoretická hustota	$[-]$
$T_c$	- vstupní teplota chladiva	$[\text{K}]$
$T_{co}$	- teplota vnějšího povrchu pokrytí	$[\text{K}]$
$T_o$	- teplota středu pelety	$[\text{K}]$
$T_p$	- teplota povrchu pelety	$[\text{K}]$
$T_{(r)}$	- teplota ve vzdálenosti $r$	$[\text{K}]$
$u$	- rychlost fononu	$[\text{m.s}^{-1}]$
$v_{kaz}$	- rychlost proudění chladiva	$[\text{m.s}^{-1}]$
$V_p$	- objemový poměr příměsi	$[-]$
$V_{up}$	- objem prostoru mezi horním koncem palivového sloupce a horní uzávěrkou palivového proutku	$[\text{m}^3]$
$W$	- hmotnostní poměr	$[-]$
$y$	- šířka zkosení	$[\text{m}]$
$\alpha$	- teplotní součinitel objemové roztažnosti	$[\text{K}^{-1}]$
	- úhel zkosení	$[\text{°}]$
$\beta$	- % vyhoření na atom	$[\text{°}]$
$\theta$	- Einsteinova teplota	$[\text{K}]$
$\lambda$	- součinitel tepelné vodivosti	$[\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$
$\mu_n$	- pohyblivost elektronů	$[\text{m}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}]$
$\mu_h$	- pohyblivost děr	$[\text{m}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}]$
$\rho$	- hustota látky	$[\text{kg.m}^{-3}]$
$\sigma$	- měrná elektrická vodivost látky	$[\text{S.m}^{-1}]$
$\sigma_r$	- mez pevnosti v tahu	$[\text{Pa}]$

---

$\sigma_z$	- axiální napětí	[Pa]
$\sigma_\theta$	- tangenciální napětí	[Pa]
$\nu$	- Poissonova konstanta	[-]
$\vartheta$	- integrální tepelná vodivost	[W.m <sup>-1</sup> ]

# 1 ÚVOD

Vývoj lidské společnosti je pevně spjatý se zvyšováním spotřeby energií. Nejrozvinutější státy světa se podílí na této spotřebě většinou. Jelikož je však současný energetický průmysl založen především na spalování fosilních paliv, při kterých vznikají emise ovlivňující životní prostředí, stává se postupem času tento způsob získávání energie nevýhodným. Na základě Pařížské dohody, součást Rámcové úmluvy OSN o změně klimatu, kterou podepsaly a následně ratifikovaly téměř všechny země světa, a která je zavazuje především ke snaze snižování množství  $\text{CO}_2$  a udržení zvýšení průměrné globální teploty pod  $2^\circ\text{C}$  oproti předindustriální době, zjišťují postupně státy světa potřebu přeorientovat se na jiný druh získávání elektrické energie.

K naplnění těchto cílů může sloužit především jaderná energetika. Jakožto zdroj téměř čisté energie, který produkuje minimum odpadu ve srovnání s klasickými tepelnými elektrárnami spalujícími fosilní paliva, a který především produkuje dostatečný výkon k pokrytí široké spotřeby bez závislosti na výkyvu počasí, se jeví jako ideálním zdrojem. Pro naše podmínky, které omezují masivní využití obnovitelných zdrojů, je jaderná energetika jedním z možných způsobů k naplnění klimatických cílů a zároveň k zachování statusu státu jakožto soběstačného subjektu a exportéra elektrické energie.

Využívání jaderné energetiky je provázané především s bezpečností. Jak v nedávné době ukázala nehoda v japonské jaderné elektrárně Fukušima Daiči, nehody spojené s tímto druhem zdroje energie bývají katastrofální, zasahující široké území a ovlivňující životní prostředí na dobu několika stovek let. Z tohoto důvodu existuje mezinárodní shoda a motivace ke snižování rizik, z odolňování a zálohování použitých systémů a technologických celků. Jedním z cílů k naplnění požadavku snížení rizika je snaha o zvyšování odolnosti paliv pro lehkovodní reaktory proti těžkým nehodám, především spojené se zvyšováním tepelné vodivosti pelet.

Tlakovodní reaktor, nejrozšířenější a nejvíce stavěný typ reaktoru po celém světě, využívá jako paliva slinované keramické pelety z oxidu uraničitého, které jsou obohacené na požadovanou úroveň. Keramika má vhodné vlastnosti v oblasti odolnosti proti provozním podmínkám, nevýhodou je však její poměrně malý součinitel tepelné vodivosti. Její zvyšování je pak důležité z mnoha hledisek. Tepelná vodivost ovlivňuje rozložení teploty v peletě v radiálním směru, má vliv na praskání pelety, množství uvolňovaných plynných produktů štěpení a mikroskopickou i makroskopickou strukturu paliva. S vyšším součinitelem tepelné vodivosti dosahuje nejvyšší dosažená teplota pelety nižších hodnot, čímž se zvýší bezpečnostní teplotní rezerva pro přechodné stavy.

Pro dosažení lepších vlastností paliva existuje mnoho konceptů. Mezi nejslibnější metody patří užití kompozitních paliv, kde se do matrice z  $\text{UO}_2$  přidávají příměsi z řady materiálů, např. uhlíku (ve formě grafitu, diamantu a nano-trubiček), kovu (např. Mo), keramických materiálů (např.  $\text{ThO}_2$ , SiC a BeO) apod.

Tato bakalářská práce pojednává o problematice keramického paliva, konceptech řešení a v praktické části se zabývá materiálovými rovnicemi popisujícími chování kompozitního paliva s příměsí karbidu křemíku SiC a následnou úpravou zdrojového kódu programu FEMAXI 6. Výstupem této bakalářské práce je především samotný upravený program FEMAXI 6 schopný analýzy kompozitního paliva s příměsí SiC, a též i samotná citlivostní analýza možného kompozitního paliva pro JE Dukovany.

## 2 PALIVOVÝ CYKLUS

Jako každá tepelná elektrárna, tak i elektrárna jaderná potřebuje ke svému provozu palivo. Než se však palivo zaveze do reaktoru, předchází tomu proces těžby, obohacení na požadovanou úroveň a samotná výroba pelety, palivového proutku a palivové kazety. Jakmile palivo dosáhne určitého stupně vyhoření na konci plánovaného pracovního cyklu, jsou celé kazety přemístěny do bazénu vyhořelého paliva a následně putují buď do přepracovacího závodu (v uzavřeném palivovém cyklu) nebo do meziskladů a výhledově do trvalých úložišť jaderného odpadu (v otevřeném palivovém cyklu). Jelikož uzavřeného palivového cyklu využívají jen země s potřebným potenciálem, je dále popsán otevřený palivový cyklus.

### 2.1 Těžba a úprava uranové rudy

Uran je relativně hojně rozšířený kov v zemské kůře, avšak nenachází se v čisté podobě, nýbrž v podobě sloučenin. Nejbohatší horniny na uran jsou uranové rudy, například uraninit a smolincec, jejichž nejvýznamnější naleziště se nacházejí v Austrálii, v Kazachstánu, ve Spojených státech, v Kanadě, Africe a Rusku. Celý jaderný palivový cyklus tedy začíná geologickým průzkumem.

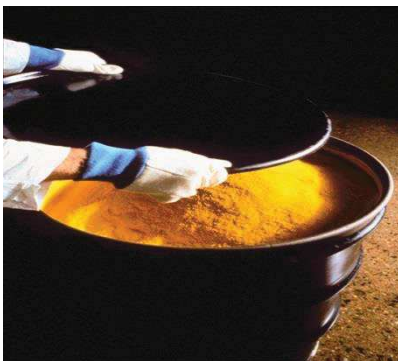


*Obr. 2-1 Uranová ruda [34]*

Existují různé techniky k vyhledávání uranu, kterými může být např. radiometrický průzkum, chemický odběr vzorků podzemních vod a půdy, případně průzkumné vrty. Naleznou-li se z ekonomického hlediska vhodné lokality, kde jsou dostatečně velká a přístupná ložiska uranové rudy, je dalším krokem výběr vhodné metody dobývání samotné horniny. Uran lze těžit klasickým hornickým způsobem (povrchový důl, hlubinný důl), případně umožňují-li to geologické podmínky, technologií chemického loužení. Loužicí činidlo (např. kyselina sírová) se pumpuje do podzemí, kde postupně dochází k rozpouštění rudy, a uranový roztok se vyčerpává pro další zpracování. Problémem tohoto procesu je hrozba rozsáhlého zamoření podzemních vod a vznik lagun toxického a radioaktivního odpadu, které zůstávají i po skončení těžby. V uranové rudě je uran obsažen podle naleziště od koncentrace 2 až 3 g na tunu rudy (chudá rudná žíla) až po 10 až 30 kg na tunu rudy (bohatá rudná žíla). Těžba uranu dává ekonomicky smysl pouze v nalezištích s koncentrací dosahující minimálně 1 kg/t (0,1 %). [2]

Přírodní uran je složen z izotopu  $^{238}\text{U}$  (tvoří 99,282 %w), izotopu  $^{235}\text{U}$  (tvoří 0,712 %w) a izotopu  $^{234}\text{U}$  (tvoří 0,006 %w). V případě, že je uran těžen klasickou cestou, putuje vytěžená ruda do mlýna, kde se rozdrtí a rozele na jemný prášek, jenž je následně louhován v kyselině sírové (případně v silném alkalickém roztoku), čímž se umožní separace uranu z horniny. Výsledný roztok se vysráží do formy oxidu (např.  $\text{U}_3\text{O}_8$ ) jako tzv. „žlutý koláč“. Zbývající část rudy (hlušina) musí být izolována od okolního prostředí, jelikož může obsahovat v nízkých koncentracích radioaktivní materiály s dlouhým poločasem rozpadu a toxické materiály, např. těžké kovy.





*Obr. 2-2 Uranový prášek ve formě žlutého koláče [35]*

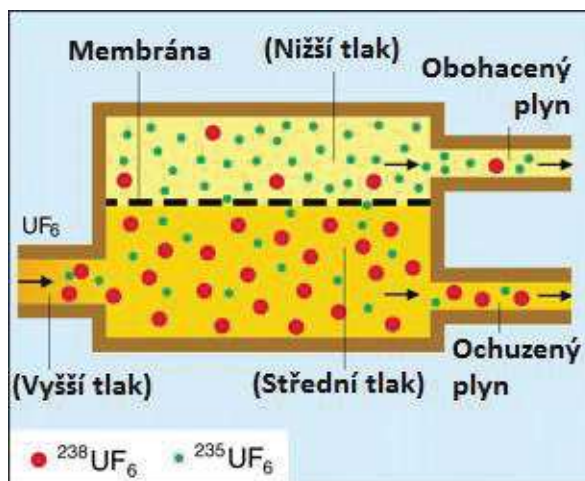
## 2.2 Obohacování uranu

Čistě přírodní uran lze použít jen v těžkovodních či grafitových reaktorech. Pro provoz lehkovodních reaktorů je vyžadovaná koncentrace izotopu  $^{235}\text{U}$  vyšší než se nachází v přírodním uranu. Pro většinu jaderných elektráren se obohacuje palivo do 5 %  $^{235}\text{U}$ , obohacení u většiny výzkumných a experimentálních reaktorů je v rozmezí od 5 % do 20 % a palivo obohacené nad 20 % lze použít pro některé výzkumné reaktory a rychlé reaktory. Obohacování je velmi složitý a finančně náročný technologický proces. Obohacovací závody lze nalézt např. v USA, Francii, Rusku, Německu, Brazílii apod.

Pro obohacování je nejprve nutné oxid uranu  $\text{U}_3\text{O}_8$  přeměnit z pevného skupenství na plyn hexafluorid uranu  $\text{UF}_6$ . Tento fluorid má vhodné fyzikální vlastnosti pro obohacování, na druhou stranu je vysoce toxický a silně korozivní. Obohacování se v praxi provádí plynovou difuzí nebo plynovou centrifugou. Dalšími způsoby obohacování mohou být metody laserové (ve fázi vývoje) či elektromagnetické (metoda užitá při projektu Manhattan). [9]

### 2.2.1 Plynná difuze

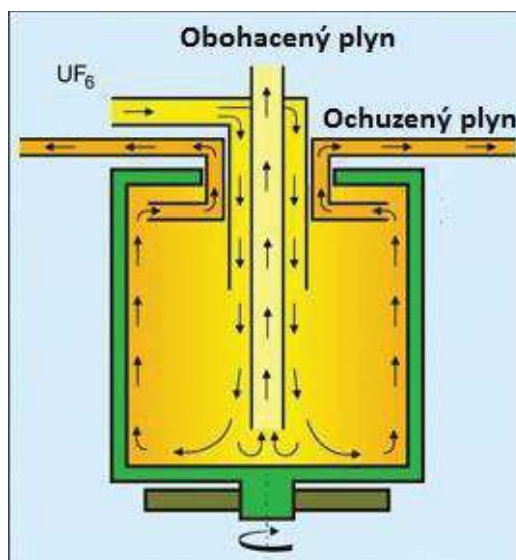
Metoda plynové difuze, zobrazena na Obr. 2-3, je založena na principu pronikání (difuze) plynné formy uranu (plynného hexafluoridu uranu  $\text{UF}_6$ ) přes tenkou pórovitou stěnu působením tlakového rozdílu. Materiálem pro pórovitou stěnu může být např. slitina Ag-Zn, kde stěna obsahuje otvory o průměru asi  $10^{-8}$  m [9]. Oproti izotopu  $^{238}\text{U}$  mají izotopy  $^{235}\text{U}$  menší hmotnost a při stejné teplotě větší průměrnou rychlost, difundují proto přes stěnu rychleji, takže plyn za stěnou obsahuje více lehčího izotopu  $^{235}\text{U}$ . Vzhledem k tomu, že rozdíly ve hmotnosti atomů jednotlivých izotopů jsou velmi malé, je pro dosažení potřebného obohacení nutno zapojit za sebou několik set až několik tisíc difuzních stupňů. Plynná difuze je energeticky velmi náročná, jelikož kompresory musí protlačit plyn všemi membránami. Celý proces probíhá za teploty potřebné pro udržení plynného skupenství, řízená elektrickými ohříváky, které se však na spotřebě podílejí menší měrou.



Obr. 2-3 Princip plynné difuze [36]

### 2.2.2 Metoda využívající odstředivých sil

Další používanou metodou je obohacování v plynných odstředivkách, nebo-li centrifugách. Plyn  $\text{UF}_6$  se točí při vysoké rychlosti v sérii válců, jenž oddělují izotopy  $^{235}\text{U}$  a  $^{238}\text{U}$  v důsledku jejich různých atomových hmotností. Na základě větší odstředivé síly, způsobené vyšší hmotností, se atomy izotopu  $^{238}\text{U}$  dostávají ke stěně válce, kde se hromadí a postupně odsávají. Na lehčí atomy izotopu  $^{235}\text{U}$  nepůsobí tak velká síla, proto se shromažďují více u osy rotace. Naznačený princip reprezentuje Obr. 2-4. Za účelem docílení potřebného obohacení je taktéž i u této metody nutné použít technologických celků s několika tisíci odstředivkami. Spojují se paralelně do stupňů (pro zvýšení produkce) a sériově do kaskád (pro zvýšení stupně obohacení). Tato metoda má podstatně menší spotřebu energie než-li difuzní metoda. Účinnost metody je závislá především na otáčkách centrifugy [10].

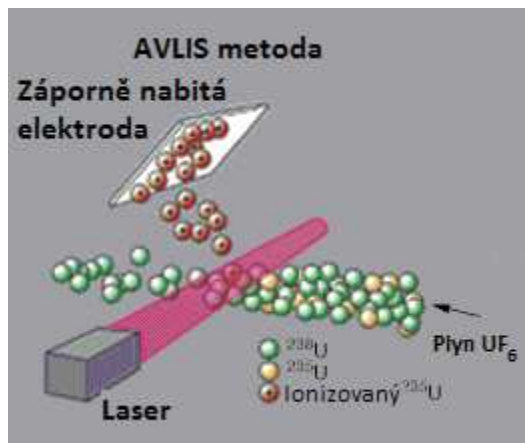


Obr. 2-4 Princip obohacování uranu v centrifugách [37]

### 2.2.3 Laserová separace

K implementaci z vývoje do praxe mají nejbližší separační laserové metody Atomic vapor laser isotope separation (AVLIS) a molecular laser isotope separation (MLIS), s potenciálem dosáhnout vyššího počátečního obohacení připadající na jeden stupeň než dnes používané metody. Díky této vlastnosti mohou produkovat obohacený uran mnohem rychleji než ostatní metody. Obě metody

umožňují získávat z přírodního uranu až 96 % izotopu  $^{235}\text{U}$  při menší energetické náročnosti [9]. Laser naladěný na konkrétní energetickou hladinu má schopnost excitovat pouze plynné atomy jednoho izotopu, zatímco ostatní zůstávají v původním stavu. Ionizované izotopy lze následně elektromagneticky nebo chemicky oddělit. [8]



Obr. 2-5 Princip AVLIS metody obohacování uranu [8]

## 2.3 Výroba palivových pelet

Hexafluorid uranu  $\text{UF}_6$  obohacený na požadovanou hodnotu nemá vhodné fyzikální vlastnosti pro provoz jaderného reaktoru, proto je nutné ho chemickou cestou převést na oxid urančitý  $\text{UO}_2$ . Ze všech sloučenin uranu vykazuje tento materiál ve formě keramiky největší stabilitu za zvýšené teploty a při ozařování. Má dobrou odolnost proti korozi, avšak je citlivý na tepelné rázy a má nízký součinitel tepelné vodivosti, který klesá s rostoucí teplotou. Teplotu tavení má  $2880\text{ }^\circ\text{C}$  a hustotu  $10\,950\text{ kg/m}^3$  [21] při nulové pórovitosti. [9]

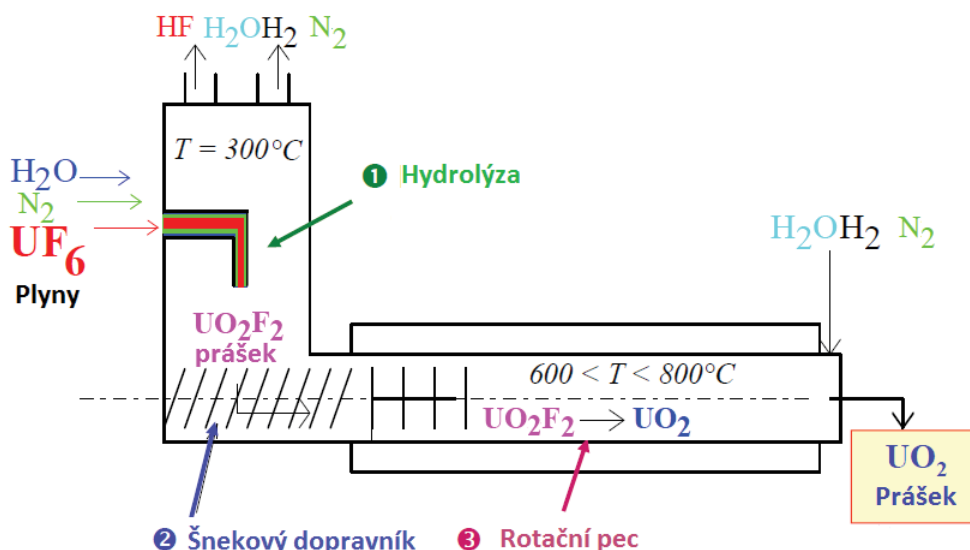


Obr. 2-6 Palivová peleta [38]

Přeměnu  $\text{UF}_6$  na  $\text{UO}_2$  lze provádět pomocí "suché" nebo "mokré" metody. U suché metody je nejprve  $\text{UF}_6$  zahříván, převeden na plynné skupenství a následně pak dopraven do dvoustupňové reakční nádoby (například rotační pec), kde dojde ke kontaktu s párou. Chemickou reakcí vznikne pevný uranyl fluorid  $\text{UO}_2\text{F}_2$ , který je hnán přes druhý stupeň nádoby. V této části procesu reaguje  $\text{UO}_2\text{F}_2$  s vodíkem  $\text{H}_2$  (zředěný v páře) a dochází k vyseparování fluoridu, čímž se chemicky redukuje uran do čistého mikrokrystallického  $\text{UO}_2$ . [12]

Chemické rovnice přeměny  $\text{UF}_6$  na  $\text{UO}_2$  pomocí suché metody:

- $\text{UF}_6 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{UO}_2\text{F}_2 + 4\text{ HF}$       Hydrolýza
- $\text{UO}_2\text{F}_2 + \text{H}_2 \Rightarrow \text{UO}_2 + 2\text{ HF}$       Redukce



Obr. 2-7 Schématické naznačení suché metody přeměny  $UF_6$  na  $UO_2$  [18]

Mokrý způsob je realizován vstřikováním pevného  $UF_6$  do vody za vzniku suspenze  $UO_2F_2$ , která je smíchaná s amoniakem  $NH_3$  nebo uhličitarem amonným  $(NH_4)_2CO_3$ . Suspenze se dále filtruje, suší a zahřívá se v redukční atmosféře, kde se mění na čistý  $UO_2$ . Volba přídavné směsi má vliv na finální mikrostrukturu pelet. Mokrý způsob je o něco málo složitější, má však větší flexibilitu ve změně vlastností uranového prášku  $UO_2$  [12]. V poslední době se z finančních důvodů přechází na suchou konverzi, při níž nevznikají kapalně odpadové a rovněž celkové množství odpadů je v porovnání s mokрыmi metodami nižší. [14]

Chemické rovnice přeměny  $UF_6$  na  $UO_2$  pomocí mokré metody:

- $UF_6 + 5 H_2O + 10 NH_3 + 3 CO_2 \Rightarrow (NH_4)_4(UO_2(CO_3)_3) + 6 NH_4F$
- $(NH_4)_4(UO_2(CO_3)_3) + H_2 \Rightarrow UO_2 + 3 H_2O + 4 NH_3 + 3 CO_2$

Do uranového prášku mohou být následně přidána aditiva, jako jsou maziva, absorbátory neutronů (např. gadolinium) apod. Pro zajištění homogenity se vše následně promíchá, čímž se zajistí rovnoměrné rozložení jednotlivých mikrostruktur v objemu. Následuje biaxiální lisování do válcového tvaru pod tlakem několika set MPa a dvou až třídní slinování v peci za teploty přes 1400 °C v řízené redukční atmosféře (obvykle argon-vodík), kde dochází k výraznému zvýšení jejich hustoty a tím i zmenšení objemu. Pelety jsou následně broušeny a opracovány na přesné rozměry – průměr 7 až 10 mm a výška 10 až 15 mm [4]. Vzniklý odpad je přiváděn zpět do dřívější fáze procesu výroby.

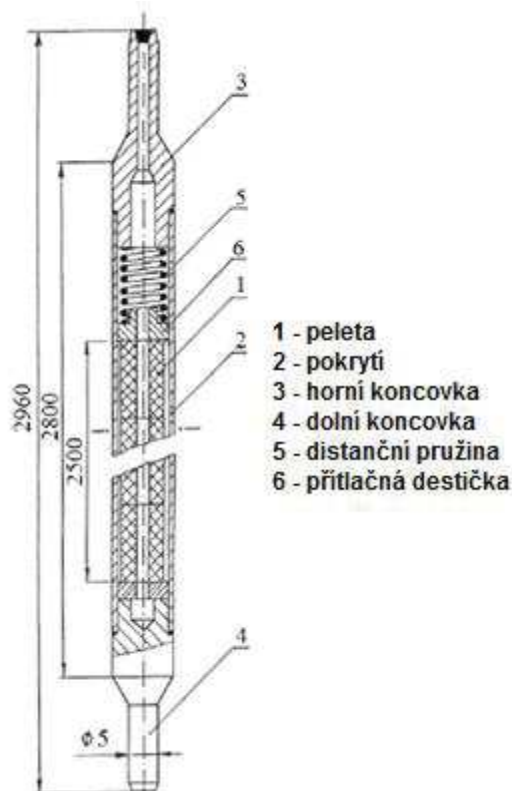
## 2.4 Palivová kazeta VVER 440

Následující kapitola je psána na základě zdrojů [9,13,14].

Palivová kazeta je podrobena zvýšené kontrole, jelikož obsahuje samotné jaderné palivo a po zavezení do reaktoru i produkty štěpení a minoritní aktinidy. Především však pracuje ve velmi specifických podmínkách aktivní zóny, kde na ní působí radioaktivní záření, vysoké tepelné toky, dynamické namáhání atd.

### 2.4.1 Palivový proutek

Nejzákladnější částí celé palivové kazety je palivový proutek. Skládá se ze samotného paliva (ve formě palivových pelet) a z pokrytí, které hermeticky odděluje palivo od chladiva a především zabraňuje úniku produktů štěpení a minoritních aktinidů do primárního okruhu JE. Pokrytí palivového proutku je realizováno tenkostěnnou trubičkou ze slitiny zirkonia a niobu ( $Zr + 1\% Nb$ ) s vnějším průměrem přibližně 9,1 mm a silou stěny 0,65 mm (hodnoty se liší dle výrobní řady palivové kazety). Materiál pokrytí má nízký účinný průřez pro absorpci, chemickou stálost, dobrou tepelnou vodivost, vhodné mechanické vlastnosti apod.



Obr. 2-8 Řez palivovým proutkem VVER 440 [14]

Konce palivového proutku jsou uzavřeny koncovkami, přivařenými k pokrytí elektronovým paprskem. Vnitřek proutku je vyplněn heliem o tlaku 300 až 700 kPa, které zlepšuje přestup tepla z paliva do pokrytí. Vlivem uvolňování produktů štěpení se tlak uvnitř postupně zvyšuje a může dosahovat až 10 MPa na konci kampaně. Uvnitř palivového proutku se pak nachází palivové pelety o určitém průměru a výšce. Jelikož tvar palivových pelet není unifikovaný pro všechny reaktory stejné vývojové řady, můžou se rozměry lišit – viz čerpání projektových rezerv a zvyšování výkonu EDU, kde se změnil i tvar pelet. Pro případ původního paliva užítoho ve VVER 440 je průměr 7,6 mm a výška 10 mm, se středovým otvorem o průměru 1,4 – 1,6 mm, jež je zde z důvodu snížení teplotní špičky a tím i snížení pravděpodobnosti tavení ve středu pelety. Kromě toho se zvětšuje i prostor k hromadění plynných produktů štěpení. V současné době se od používání centrálních otvorů upouští. Každý palivový proutek obsahuje okolo 1,06 kg  $UO_2$ .

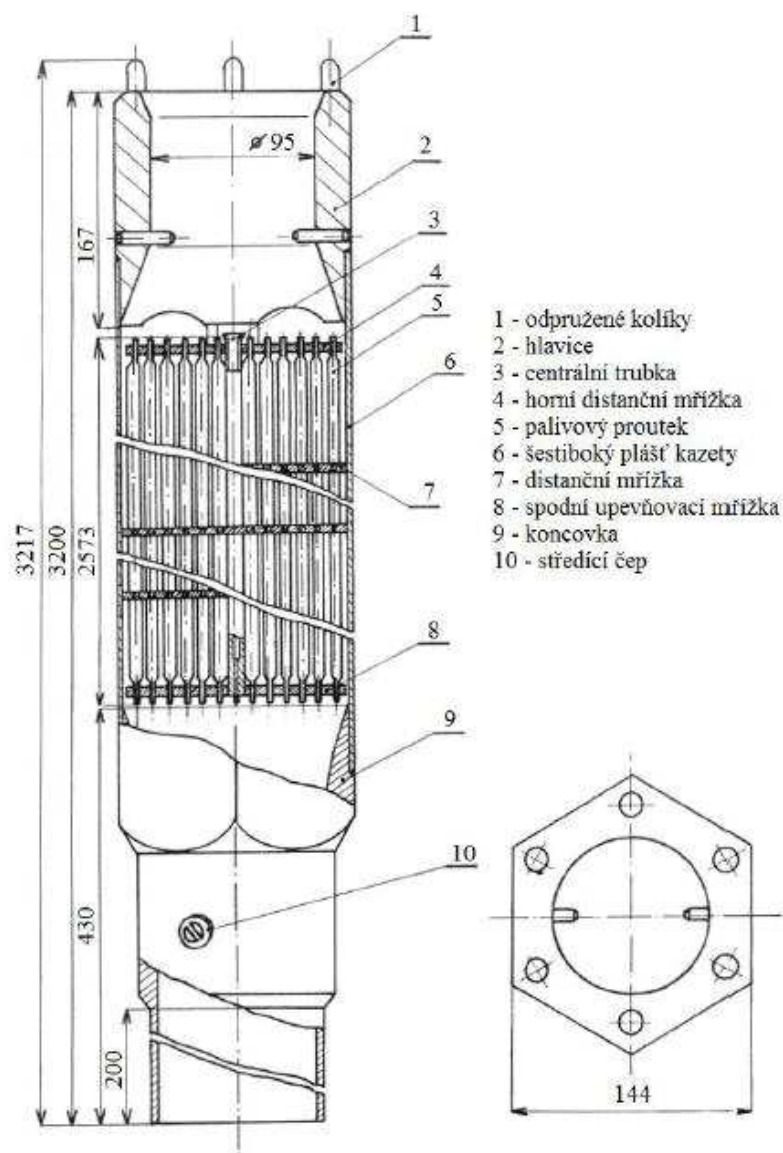
Další konstrukční částí je distanční pružina s přitlačnou destičkou, umístěná v horní části palivového proutku, která udržuje palivové pelety v pracovní poloze. Výška palivového sloupce se opět pro jednotlivé typy paliva mírně liší, avšak pohybuje se okolo hodnoty 2,42 m. V průběhu kampaně však dochází vlivem objemového růstu, tepelné roztažnosti a dalším vlivům během vyhořívání k zvětšování délky palivového sloupce.



### 2.4.2 Konstrukce palivové kazety VVER 440

Palivová kazeta pro reaktor typu VVER 440 je složena ze 126 palivových proutků, distančních mřížek, šestihranné obálky (typické pro východní typ reaktorů, západní má vesměs čtvercový tvar), válcové koncovky (pro ustavení palivové kazety v otvoru nosné desky koše aktivní zóny) a hlavice (k uchycení palivové kazety zavážecím strojem).

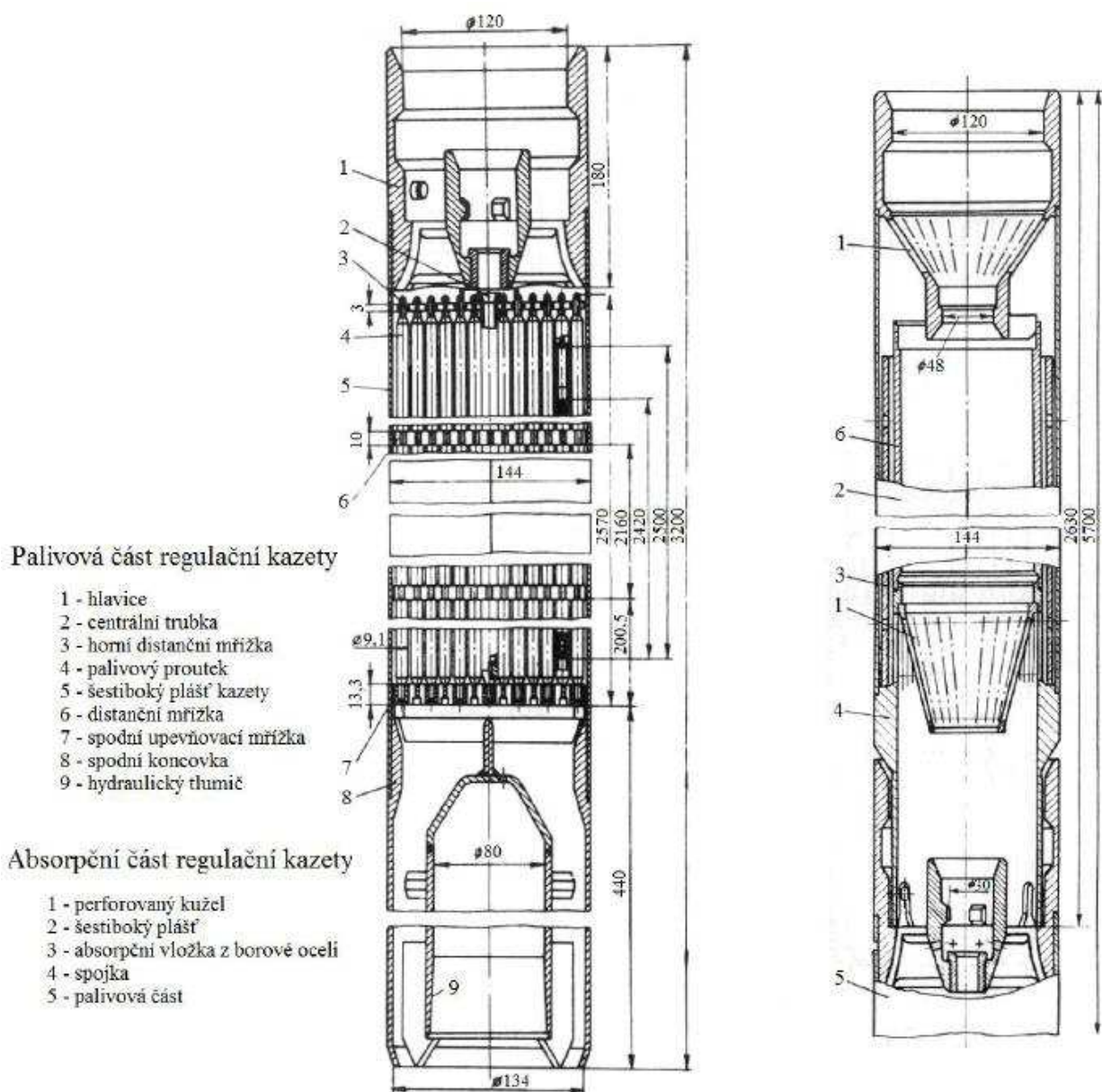
Palivové proutky se upevňují do svazku tvořeného ze zirkoniové centrální trubky spojené s 10 distančními mřížkami z austenitické oceli. Rozteč mezi jednotlivými proutky je 12,2 mm. Svazek okolo centrální trubky je obalen šestihrannou obálkou ze slitiny zirkonia a niobu ( $Zr + 2,5 \% Nb$ ) o tloušťce stěny 1,5 mm a rozměrem na klíč 144 mm. Palivové proutky jsou svými dolními koncovkami vsunuty do spodní nosné mřížky, horní distanční mřížkou pak jen prochází a nejsou pevně připevněny, což umožňuje jejich pohyb způsobený axiální dilatací. V horní části v hlavici palivové kazety je umístěno 6 odpružených kolíků, které umožňují pružné uložení palivové kazety v reaktoru. Spodní část palivové kazety tvoří válcová koncovka, která se zasunuje do otvoru nosné desky koše aktivní zóny a tím se určuje i poloha palivové kazety v reaktorové nádobě. Ve spodní vodící části palivové kazety se pak dále nalézá středící čep, který slouží k fixaci polohy v nosné desce.



Obr. 2-9 Řez palivovou kazetou VVER 440 [14]

### 2.4.3 Konstrukce regulační kazety VVER 440

V reaktoru typu VVER 440 se nachází 312 palivových kazet a 37 regulačních kazet, které jsou dvoudílné a vertikálně pohyblivé – uspořádání tzv. tandemové regulace. Dolní část je totožná s palivovými kazetami, horní část tvoří absorpční nástavec, který je vyroben z ocelového šestibokého pláště stejného tvaru. Na vnitřní povrch jsou připevněny vložky z oceli s příměsí 2 %<sub>w</sub> boru B, které jsou rozmístěné po celém vnitřním povrchu. Uvnitř absorpční části se nalézá trubka zajišťující intenzivnější odvod tepla z absorpčních vložek. Na spodní části regulační kazety je umístěno tlumicí zařízení, které zpomaluje pohyb kazety při bezpečnostním odstavení reaktoru. Ke změnám reaktivity dochází jednak vysouváním palivové části článku do prostoru aktivní zóny, čímž se zvýší množství štěpitelného materiálu uvnitř zóny, jednak zasouváním absorbéru do aktivní zóny, čímž dochází k pohlcování neutronů a tím i zmenšování počtu štěpení. Regulační tyče slouží k regulaci výkonu, kompenzaci přebytečné reaktivity i k havarijnímu odstavení reaktoru.



Obr. 2-10 Řez regulační kazetou VVER 440. Vlevo palivová část, vpravo absorpční část. [14]

## 2.5 Zavážení a výměna paliva v reaktoru

Pro udržení řetězové reakce v ustáleném stavu musí být v reaktoru takové množství paliva, které přesně odpovídá kritické hmotnosti při daných pracovních podmínkách. Při nadbytku paliva nad kritickou hmotnost bude koeficient násobení vyšší než 1, v každé generaci se uvolní více neutronů než v té předchozí, a hrozí tak vznik nekontrolovatelné řetězové štěpné reakce. Naopak při menším množství paliva bude reaktor v podkritickém stavu a štěpná řetězová reakce se začne utlumovat. V průběhu vyhořívání se v palivových proutcích akumulují minoritní aktinidy a produkty štěpení, mezi které patří i absorbátory neutronů, čímž se mění neutronová bilance a kritičnost reaktoru [9]. Z tohoto důvodu je nutná výměna paliva za čerstvé, a to buď kontinuálně, kde probíhá výměna paliva za provozu (při plném nebo sníženém výkonu – reaktory typu CANDU), nebo jak je tomu u drtivé většiny provozovaných reaktorů, kampaňovitě. Při tomto způsobu je do reaktoru vložen mírný přebytek reaktivity a ten je kompenzován zavedením absorbátorů do aktivní zóny (poloha regulačních kazet, koncentrace kyseliny borité v chladivu). Vlivem postupného hromadění absorbátorů neutronů v aktivní zóně je nutné snižovat koncentraci kyseliny borité v chladivu, a tím udržovat a řídit štěpnou reakci. [9]

Palivové kazety jsou z výrobního závodu převezeny do elektrárny, kde jsou na stanovených místech uskladněny až do doby jejich zavezení do reaktoru pomocí zavážecího stroje, který je vybaven teleskopickou tyčí se zařízením pro uchopení kazety. U kampaňovité metody jsou palivové kazety v reaktoru provozovány po dobu 3 až 5 let, přičemž je snaha tuto dobu postupně prodlužovat. Doba se odvíjí od jednotlivých typů reaktoru, stupně vyhoření paliva, a především podle stanovené délky kampaň. [14]

Částečná výměna paliva u kampaňovitého způsobu se provádí cca jednou ročně, kdy je reaktor odstaven, dochlazen a tlak uvnitř nádoby se sníží na atmosférický. V průběhu dochlazování se zároveň provádí čištění vody primárního okruhu od radioaktivních nečistot. Je-li reaktor odstaven, reaktorová šachta se zaplní vodou a odmontuje se víko reaktorové nádoby. Prostřednictvím zavážecího stroje, nastavovaného pomocí souřadnicového systému nad jednotlivé palivové kazety, se část paliva, která je na konci provozního cyklu, přemístí do bazénu vyhořelého paliva, nacházejícího se poblíž reaktoru. Jelikož palivové kazety i po vyvezení z reaktoru produkují teplo (tepelný výkon několik set kW) v důsledku radioaktivní přeměny produktů štěpení, jsou v bazénu vyhořelého paliva skladovány 5 až 10 let, během níž aktivita i tepelný výkon poklesnou.



Obr. 2-11 Zavážecí stroj Jaderné elektrárny Dukovany [39]



Zbylé palivo v reaktoru je následně zkontrolováno a přemístěno tak, aby bylo vhodné rozloženo vyhořívání paliva, rozložení tepelné energie, neutronového toku, a tím i namáhání reaktorové nádoby. [9,14]

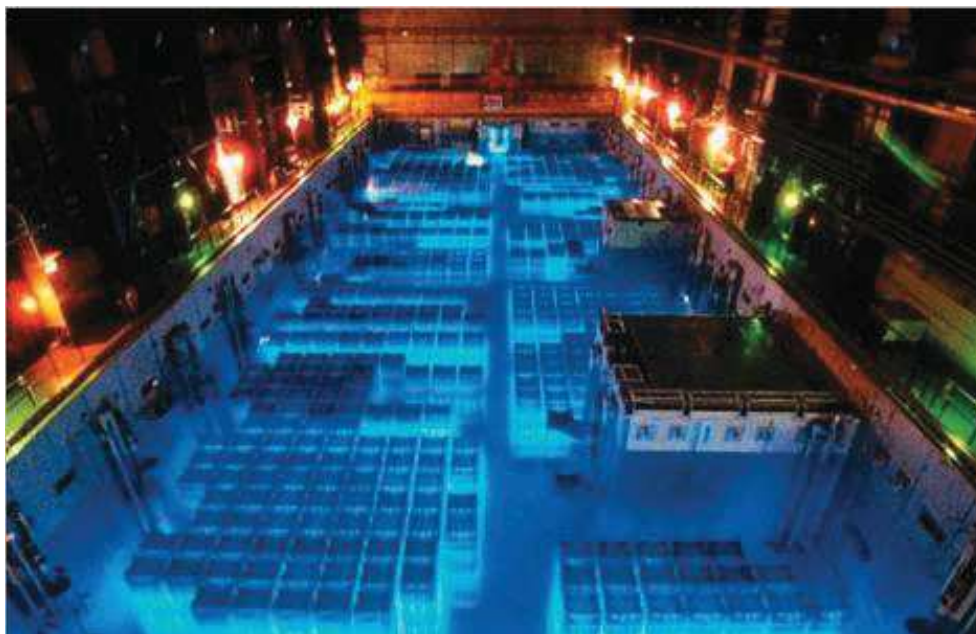
## 2.6 Skladování použitého paliva

### 2.6.1 Mezisklad

Klesne-li aktivita palivových kazet na polovinu (a stejně tak se sníží množství produkovaného tepla), přemísťuje se použité palivo do meziskladu vyhořelého jaderného paliva. Je nezbytné palivo skladovat tak, aby nepředstavovalo žádné nebezpečí pro životní prostředí, a zároveň zajistit jeho neustálé chlazení. Za tímto účelem se budují mezisklady. Jedná se o zařízení pro dlouhodobější skladování použitého paliva, cca 10 až 50 let, než je přepracováno nebo uloženo v hlubinném úložišti. Většina meziskladů je umístěna přímo v areálu jaderné elektrárny, kde se nalézají potřebné inženýrské sítě a je zde dobře prozkoumáno geologické podloží. Jedna z výhod meziskladu spočívá v tom, že se v něm palivo postupně hromadí, a na přepracování nebo do konečného úložiště jsou pak převezeny najednou, což je jednodušší, levnější i bezpečnější. Existují dva typy meziskladů, a to mezisklad suchý a mokrý. [15,16,17]

#### 2.6.1.1 Mokrý mezisklad

Mokrý způsob skladování je dnes ve světě nejrozšířenější, je založen na stejném principu jako bazény skladování. Výhodou tohoto uložení je jednoduchá vizuální kontrola i stálé chlazení cirkulující vodou, která funguje navíc v dostatečné vrstvě jako ochrana před zářením. Nevýhoda spočívá v nutnosti neustálé cirkulace a čištění vody, vznikají kapalně radioaktivní odpady, což v důsledku představuje potřebu vyšších provozních nákladů oproti suchému skladování.



*Obr. 2-12 Mokrý mezisklad La Hague ve Francii [40]*

Samostatné mokré mezisklady slouží pro skladování použitého paliva z několika bloků nebo elektráren. Mokré mezisklady se nacházejí nejčastěji poblíž reaktorů. Mimoreaktorové mokré sklady má např. Slovensko (centrální úložiště v areálu elektrárny Jaslovské Bohunice), Švédsko (centrální úložiště CLAB), Francie (přepracovatelský závod La Hague) nebo Velká Británie (přepracovatelský závod Sellafield). [15,16,17]

### 2.6.1.2 Suchý mezisklad

Suché mezisklady představují novější, jednodušší a spolehlivější technologii meziskladování použitého jaderného paliva. Suché skladování má nízké provozní náklady, žádné nebo malé množství korozních produktů, umožňuje snadnou manipulaci a možnost rozšíření skladu. Chlazení je zde zajišťováno přirozenou cirkulací vzduchu nebo nucenou cirkulací inertního plynu.

Ukládání je konstrukčně řešeno dvojím způsobem, a to buď umístěním paliva do betonových staveb (sklípků), nebo do betonových či kovových kontejnerů. Příkladem prvního přístupu jsou modulové boxy, kde použité palivo je umístěno v trubkách naplněných inertním plynem. Trubky jsou vertikálně umístěny v betonové stavbě s cirkulujícím vzduchem (toto uspořádání má například Fort Saint Vrain v USA nebo Wylfa ve Velké Británii). Další možností jsou betonová síla s použitým palivem uloženým v ocelových koších, nacházejících se v betonových nádobách chlazených vzduchem (například, Oconee v USA, Gentilly v Kanadě).

Velmi často je palivo uloženo do speciálních skladovacích kontejnerů, které slouží zároveň i jako přepravní kontejner. Má speciální konstrukci, která izoluje okolí od většiny nebezpečného záření a umožňuje odvádění tepla z paliva na povrch kontejneru. Tyto kontejnery pak stojí v lehké budově meziskladu (např. Ahaus v Německu nebo JE Dukovany a Temelín v ČR), případně jen tak na volném prostranství (např. Surry v USA). Suchému skladování se dává přednost při delších intervalech skladování. [15,16,17]



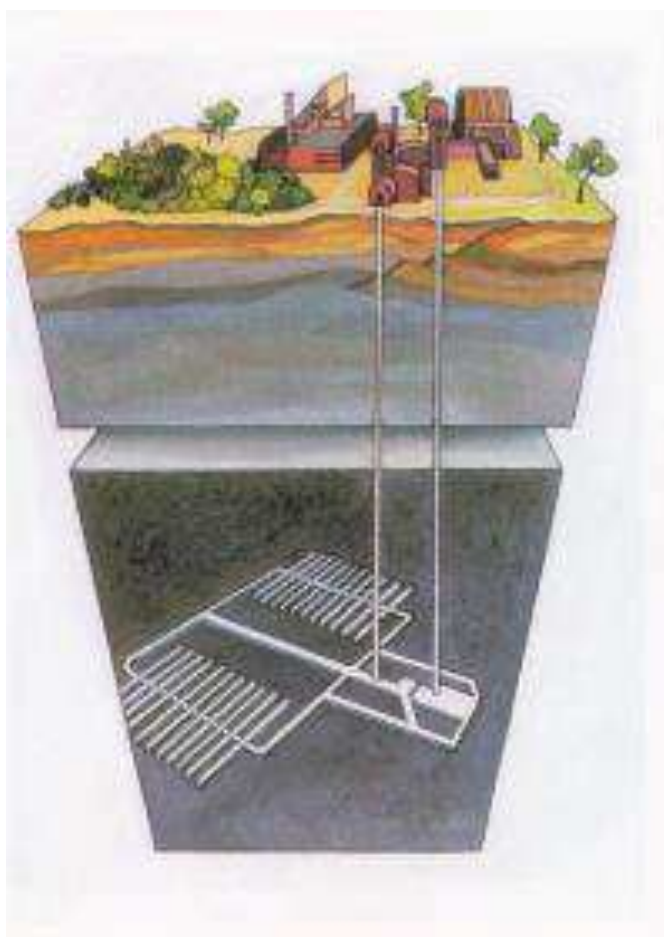
*Obr. 2-13 Suchý mezisklad JE Dukovany s kontejnery CASTOR [41]*

### 2.6.2 Hlubinné úložiště

Vysoce radioaktivní odpad, ať už přímo použité palivo nebo koncentrovaný odpad po přepracování, musí být dlouhodobě izolován od životního prostředí. K tomuto účelu budou sloužit hlubinné úložiště, kde bude palivo bezpečně izolováno desetitisíce let. Většina zemí však o svém definitivním úložišti ještě nerozhodla, jednak radioaktivního odpadu není ještě příliš mnoho a jednak jsou ve vývoji technologie ADTT (urychlovačem řízená transmutace), které by mohly jeho objem výrazně snížit, případně vysoce radioaktivní odpad z velké části redukovat a přeměnit na izotopy s podstatně kratším poločasem rozpadu. Mezi země, které musí rozhodnout o budoucnosti nakládání s jaderným odpadem patří i ČR. Konceptní řešení je nastíněno na Obr. 2-14.

Vysokoaktivní odpady, u kterých se předpokládá nebezpečná aktivita po dobu několika desítek tisíc let, je třeba uložit do stabilní geologické formace ve větší hloubce. Místo definitivního úložiště by mělo obsahovat přírodní bariéry (jíl, sůl, rula, žula), které zabrání případnému úniku radionuklidů a které se během příštích deseti tisíců let nezmění. Mělo by se jednat o lokalitu, kde se nevyskytuje spodní voda, kde nehrozí zemětřesení, tsunami, zaplavení lávou nebo mořem. O starých dolech se neuvažuje, často bývají poškozené trhacími pracemi, protkané puklinami a geologickými zlomy.

Finsko a Švédsko chtějí ukládat odpad do měděných kontejnerů a ty následně obklopit bentonitem. Belgie chce ukládat ocelové kontejnery do jílu, který zredukuje přítomnost okolní vody téměř na nulu. USA testuje v Novém Mexiku projekt Waste Isolation Pilot Plant (WIPP), kde probíhá ukládání do solných ložisek, které zaručují nepřítomnost vody. Ocelové kontejnery s použitým palivem z vojenských reaktorů zalité do betonu jsou zde ukládány 650 metrů pod povrchem. [15]



*Obr. 2-14 Koncepce hlubinného úložiště v ČR [42]*

### 3 FYZIKÁLNÍ PROCESY PŘI VYHOŘÍVÁNÍ PALIVA

V průběhu vyhořívání dochází v peletách k mnohým změnám, např. napuchání, uvolňování plynných produktů štěpení, praskání pelet, změně tvaru, zplošťování dna, změně struktury apod. Většina z těchto procesů je spojena s teplotou pelety a její schopností odvádět generované teplo. Procesy jsou provázané, kdy při příliš vysoké teplotě dochází k degradaci paliva, což vede ke zhoršení součinitele tepelné vodivosti a nárůstu teploty pelety, která opět urychluje zhoršování kvality paliva. Proto je nutné procesům porozumět, sledovat je a při dosažení určitého stupně vyhoření palivo z reaktoru vyjmout.

#### 3.1 Změna struktury paliva

Přesáhne-li teplota palivové pelety v centrální oblasti teplotu 1 700 °C, dochází k rekrystalizaci a vytváření struktur se sloupcovými krystaly. Hustota se v této oblasti pohybuje okolo 97 % teoretické hustoty a palivo má sklon k tvorbě radiálních prasklin. K rekrystalizaci dochází též i ve střední oblasti, kde teploty dosahují hodnot 1 450 až 1 750 °C. Struktura paliva je zde tvořena rovnoosými krystaly a hustota paliva je zde taktéž poněkud vyšší než původní výrobní hustota. V prvotním průběhu provozu reaktoru lze tedy očekávat, že se v palivových peletách z  $\text{UO}_2$  vytvoří v závislosti na teplotě tři radiální oblasti s rozdílnými tepelně fyzikálními vlastnostmi – centrální oblast se sloupcovými krystaly, střední oblast s rovnoosými krystaly a pak vnější oblast s původní strukturou. Dále pak po dosažení určitého stupně lokálního vyhoření dochází vlivem efektu samostínění k vytvoření tzv. RIM struktury po okraji pelety, kde hustota toku neutronů a s ním spojený tepelný výkon je vyšší než ve středu pelety. V RIM vrstvě dochází ke zjemnění velikosti zrn (nové zrna jsou 10 až 100x menší), roste lokální vyhoření a porozita. [21]

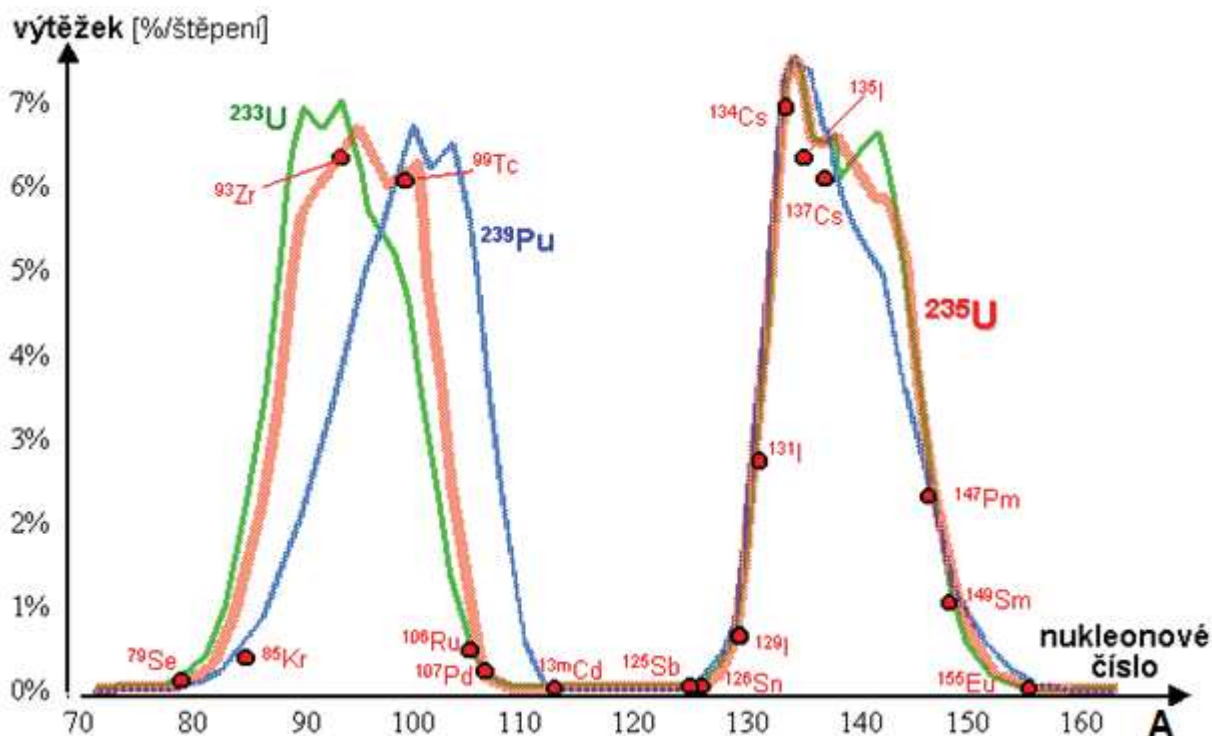
#### 3.2 Produkty štěpení

Při štěpné reakci vznikají kombinace fragmentů nejčastěji s nukleonovými čísly 80 až 110 (se středem kolem  $A=95$ ) a fragmentů s nukleonovými čísly 125 až 155 (se středem kolem  $A=137$ ). Křivka závislosti výskytu produktů štěpení na nukleonovém čísle má tedy charakteristický dvouvrcholový tvar se středy vrcholů v uvedených středních hodnotách. Nejčastějšími produkty štěpení jsou  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Xe}$ .

Grafické znázornění závislosti zastoupení produktů štěpení (% výtěžnosti na 1 štěpení) na nukleonovém čísle při štěpení jader  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  a  $^{233}\text{U}$  za pomoci tepelných neutronů, se nalézá na Obr. 3-1. Některé důležitější štěpením vznikající nuklidy jsou vyznačeny červenými kroužky v pozicích, které odpovídají výtěžnosti při štěpení nejobvyklejšího štěpného materiálu  $^{235}\text{U}$ . [20]

Jelikož jádra vzniklá štěpením jsou podstatně menší než původní těžké jádro, je poměr počtu neutronů a protonů potřebný k stabilitě jádra menší, než jaký mělo původní jádro těžkého atomu. Produkty štěpení mají tedy přebytek neutronů, a proto většina produktů štěpení je radioaktivní a dále prochází přeměnou v průměru přes 2 až 3 dceřiné izotopy. [18]





Obr. 3-1 Procentní výtěžnost na 1 štěpení  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  a  $^{233}\text{U}$  [20]

Izotopické složení vyhořelého paliva po zastavení štěpné řetězové reakce se v průběhu času výrazně mění. V důsledku přeměn radionuklidů s krátkým poločasem rozpadu je počáteční měrná aktivita velmi vysoká, s postupem času výrazně klesá, a po několika dnech začíná dominovat rozpad  $^{131}\text{I}$ , později pak  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  a další. Dlouhodobé radionuklidy, např.  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ , mají poločas rozpadu několik stovek tisíc let, čímž se z nich stává dlouhodobě nebezpečná složka vyhořelého jaderného paliva, které je proto nutno dlouhodobě skladovat. [20]

Značná část produktů štěpení se vyskytuje v plynné formě a mají výrazný vliv na chování jaderného paliva. Plynné produkty štěpení se uvolňují do volných prostor v palivovém proutku a dochází tak k nárůstu tlaku uvnitř palivové tyče. Plyny, které se neuvolní a zůstávají uvnitř paliva, se shlukují a vytvářejí bublinky, které způsobují napuchání paliva. V průběhu vyhořívání bublinky rostou, spojují se, vytvářejí tlak, který přispívá k namáhání paliva, až nakonec dojde k narušení vnitřní struktury paliva a plynné produkty štěpení se uvolní z paliva do vnitřního prostoru palivového proutku. Pro lepší odvod tepla je palivový proutek při výrobě naplněn plynem s dobrými tepelně vodivými vlastnostmi (helium). Uvolněné plynné produkty štěpení, mající zpravidla horší součinitel tepelné vodivosti, se mísí s heliem, díky čemuž dochází ke snížení součinitele tepelné vodivosti plynné výplně proutku a tím tak ke zhoršení odvodu tepla z paliva do aktivní zóny. [21]

Průměrný počet plynných produktů štěpení na 100 rozštěpených produktů se pohybuje kolem 27 atomů prvků tvořících plynné skupenství, skutečný počet však závisí na různých faktorech. Při uvolňování plynných produktů štěpení je dominantní závislost na teplotě, která se začíná projevovat při teplotách nad  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Další mezní hodnotou je teplota  $1\,700\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kde je-li teplota vyšší, lze předpokládat uvolňování všech plynných produktů štěpení, je-li teplota nižší než  $1\,700\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pak se uvolňuje pouze 50 % produktů štěpení. Tvorba plynných produktů štěpení pak dále roste s vyhoříváním paliva a závisí též na vnitřní mikroskopické struktuře paliva. [21]

### 3.3 Napuchání pelety

Postupné vyhořívání paliva způsobuje zvýšení počtu atomů uvnitř paliva. Zhruba 10% vyhoření odpovídá 10% zvýšení celkového počtu atomů (atomů uranu, produktů štěpení a minoritních aktinidů). Atomy produktů štěpení zabírají více místa než původní rozštěpený atom. Kromě zvyšování počtu atomů mají pelety svoji vlastní tepelnou roztažnost. Oba tyto jevy se spojují a vytvářejí zvětšování objemu pelety, nebo-li napuchání. Rychlost napuchání a zvětšení paliva je průměrně 0,6 % na procento vyhoření, přičemž tato závislost je konstantní až ke kritické hodnotě, která je závislá na obsahu pórů a dutin v palivu. Nad touto kritickou hodnotou roste napuchání velmi rychle. Technicky lze tento jev omezit konstrukčně, kdy se sníží měrná hustota použitých tabletek, dále pak používáním pelety s centrální dutinou atd. Ke zvýšení integrity paliva dopomáhá i pokrytí v momentě, kdy napučené palivo vyplní původní mezeru a palivo se přímo dotýká stěny palivového proutku. [18,21]

### 3.4 Praskání a přehřívání pelety

K praskání pelet dochází především díky nerovnoměrnému zahřívání, kde teplota středu pelety je mnohem větší než teplota okraje. Tento jev je zásadní především pro keramická paliva, které mají nízký součinitel tepelné vodivosti. Díky nerovnoměrnému rozložení teploty dochází k rychlejšímu rozpínání středu pelety než jeho okraje, střední oblast pelety je v tlaku, zatímco okraj je v tahu. Dochází tak ke vzniku vnitřního pnutí, které může vést až k prasknutí pelety od jejího středu k okraji a uvolnění produktů štěpení. [21,22]

Na povrchu pelet dochází k největšímu axiálnímu napětí  $\sigma_z$  a tangenciálnímu napětí  $\sigma_\theta$ :

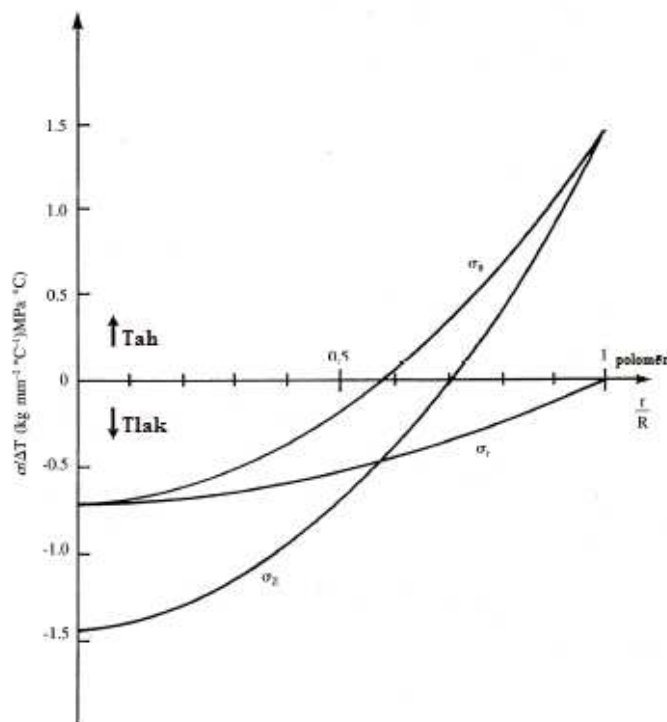
$$\sigma_\theta^{max} = \sigma_z^{max} = \frac{E \cdot \alpha}{2 \cdot (1 - \nu)} \cdot (T_0 - T_p) \quad [Pa] \quad (36.1)$$

Kde  $E [Pa]$  je Youngův modul pružnosti v tahu ( $\sim 168 \text{ GPa}$  při  $1000^\circ\text{C}$  a při 95% hustotě  $\text{UO}_2$ )  $\alpha [K^{-1}]$  je teplotní součinitel objemové roztažnosti a  $\nu [-]$  je Poissonova konstanta ( $\sim 0,31$ ) – vyjadřuje absolutní hodnotu poměru relativního zkrácení k relativnímu prodloužení vzorku namáhaného tahem.  $T_0 [K]$  je teplota středu pelety a  $T_p [K]$  je teplota povrchu pelety. [18]

Jako u většiny keramických materiálů, tak i u pelet z  $\text{UO}_2$  je křehkost zachována pouze při teplotách nižších než asi polovina teploty tavení. Plastické chování vykazují pelety při teplotách nad přibližně  $1400^\circ\text{C}$  v tahu a nad  $1100^\circ\text{C}$  v tlaku. V peletách se vytvářejí trhliny, pokud dojde k překročení meze pevnosti v tahu  $\sigma_r$ , tj. pokud:

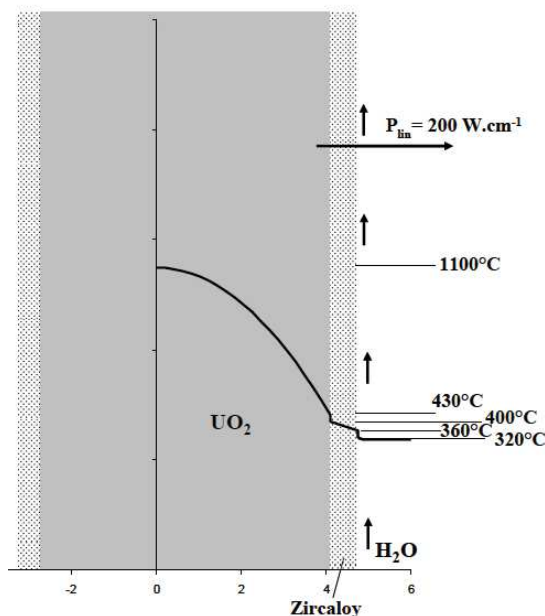
$$(T_0 - T_p) \geq 2 \cdot \frac{(1 - \nu)}{E \cdot \alpha} \cdot \sigma_r \quad [K] \quad (36.2)$$

Mez pevnosti v tahu za teploty  $1000^\circ\text{C}$ , stanovená z ohybových zkoušek, se pohybuje kolem  $130 \text{ MPa}$ . Nicméně tato hodnota se může významně měnit v závislosti na mikrostruktuře pelety a na stavu jejího povrchu. Z výše uvedené rovnice vyplývá, že peleta začne praskat, překročí-li rozdíl teplot  $T_0 - T_p$  hodnotu přibližně  $100^\circ\text{C}$ . Jelikož při prvním najeť je lineární tepelný výkon asi  $50 \text{ W/cm}$ , tak na konci prvního nárůstu výkonu jsou pelety systematicky popraskané, obsahující v průměru 8 až 10 prasklin. [18]



Obr. 3-2 Pnutí v peletě způsobené tepelným spádem [18]

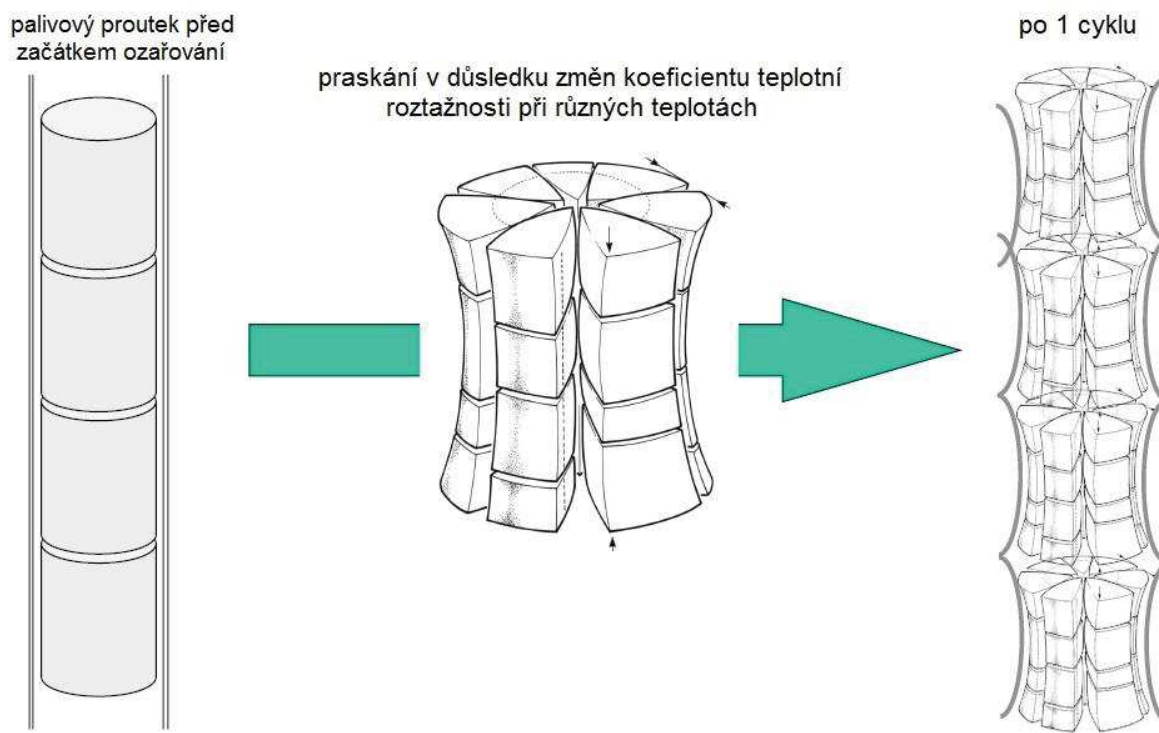
Dále pak v centrálních oblastech s teplotou nad 1 700 °C dochází k přenosu hmoty. Tento pohyb dutin a pórů v palivu ve směru teplotního gradientu vede k vytváření centrální dutiny a ke zvýšení hustoty ve středu pelety. Pro zmírnění pravděpodobnosti natavení středu a zmenšení pnutí lze v palivu při výrobě úmyslně vytvořit centrální otvor, který umožňuje dosažení vyššího tepelného zatížení paliva. Ukázka radiálního rozložení teplot v peletě a pokrytí je zobrazeno na Obr. 3-3. [21,22]



Obr. 3-3 Radiální rozložení teploty v peletě [18]

Vlivem konečné délky pelety (~10 - 14 mm) a působením pnutí vlivem tepelného spádu se původně válcové pelety mění do tvaru „přesýpacích hodin“ – viz. Obr. 3-4.

Radiální posunutí vnějšího poloměru je maximální při okrajích pelety. V tomto místě dochází k namáhání pokrytí a k vytváření několik mikrometrů vysokých hřebenů v profilu pokrytí paliva, čímž se z nich stávají místa koncentrace napětí a mohou mít vážné účinky na celistvost palivového proutku. [18]



Obr. 3-4 Praskání pelety, změna jejího tvaru a vytváření hřebenů v palivovém proutku [43]

### 3.5 Přenos tepla v peletách

Teplo produkované zpomalením štěpných fragmentů v peletách paliva je odváděno kondukcí. Jelikož poměr délky a průměru palivové tyče je velký, je možno při výpočtech zanedbat axiální vedení tepla v palivovém proutku. Rovnici pro výpočet lze psát jako [18,21]:

$$q_v + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho \cdot c_{pf} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \quad [W \cdot m^{-3}], \quad (37.1)$$

kde  $q_v [W \cdot m^{-3}]$  je měrný objemový tepelný výkon reaktoru,  $\lambda [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$  je součinitel tepelné vodivosti,  $\rho [kg \cdot m^{-3}]$  je hustota paliva,  $c_{pf} [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je měrná tepelná kapacita,  $T [K]$  je teplota a  $r [m]$  je vzdálenost od středu pelety.

Při ustáleném provozu je palivová tyč v tepelné rovnováze a rovnici lze tedy přepsat do tvaru [18,21]:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left( \lambda \cdot r \cdot \frac{dT}{dr} \right) = -q_v \quad [W \cdot m^{-3}] \quad (37.2)$$

Diferenciální rovnice (37.2) vedení tepla platí jen tehdy, nejsou-li součinitel vedení tepla  $\lambda$  a hustota výkonu  $q_v$  prostorově závislými veličinami. Pro oxid uraničitý  $UO_2$  tyto podmínky neplatí, hustota výkonu  $q_v$  je funkce závislá v radiálním směru a tepelná vodivost  $\lambda$  závisí na teplotě pelety.



Pro určení teploty ve vzdálenosti  $r$  při předpokladu  $\lambda = konst.$  a  $q_v = konst.$  lze užít vztahu:

$$T_{(r)} = T_p + \frac{q_v}{4 \cdot \lambda} (r_u^2 - r^2) \quad [K] \quad (37.3)$$

Kde  $T_p$  [K] je povrchová teplota palivové pelety a  $r_u$  [m] je její poloměr.

Radiální rozložení teplot v peletě má parabolický průběh. Teplotní rozdíly v palivovém elementu jsou úměrné konstantě  $q_v / \lambda$ .

Pro případ pelety s centrálním otvorem je vzorec pro výpočet teploty ve vzdálenosti  $r$ : [18,21]

$$T_{(r)} = T_p + \frac{q_v}{4 \cdot \lambda} \left( (r_u^2 - r^2) + 2 \cdot r_0^2 \cdot \ln \left( \frac{r}{r_u} \right) \right) \quad [K] \quad (37.4)$$

Kde  $r_u$  [m] je vnější průměr pelety a  $r_0$  [m] je vnitřní průměr pelety.

Dále dosadí-li se za měrný tepelný výkon reaktoru  $q_v$  lineární tepelný výkon palivové tyče  $q_H = \pi \cdot r_u^2 \cdot q_v$  [ $W \cdot m^{-1}$ ], pak rovnice pro plnou peletu nabude tvaru:

$$T_{(r)} = T_p + \frac{q_H}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \left( 1 - \frac{r^2}{r_u^2} \right) \quad [K] \quad (37.5)$$

Největší teplota dosahovaná v plné peletě je v její ose, kde  $r = 0$ , a tudíž tepelný spád je roven:

$$T_0 - T_p = \frac{q_H}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \quad [K] \quad (37.6)$$

Jak je vidět, rozdíl teplot mezi osou pelety o teplotě  $T_0$  [K] a povrchovou teplotou  $T_p$  [K] pelety je dán pouze lineárním výkonem palivové tyče  $q_H$  [ $W \cdot m^{-1}$ ] a součinitelem tepelné vodivosti paliva  $\lambda$  [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]. Ze souvislosti plyne, že tepelný spád není závislý na rozměru pelety.

Skutečná situace je však složitější. Jelikož tepelná vodivost  $UO_2$  silně závisí na teplotě (a tím i na poloměru), je vhodné při výpočtu teplot vycházet z Fourierova zákona: [18,21]

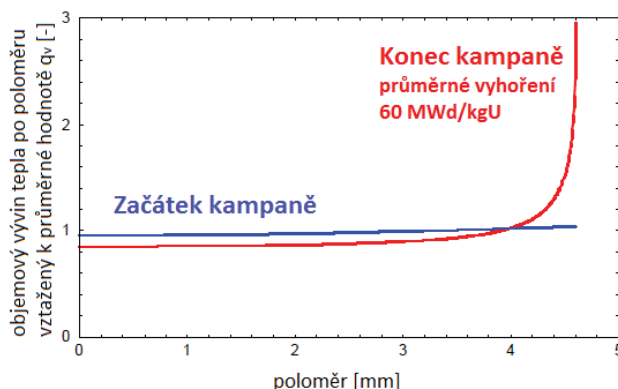
$$\frac{1}{2} q_v \cdot r \cdot dr = -\lambda(T) \cdot dT \quad [W \cdot m^{-1}] \quad (37.7)$$

Postupným zjednodušením, s předpokladem konstantního měrného objemového vývinu tepla  $q_v = konst.$ , integrací, a opětovným zavedením lineárního tepelného výkonu  $q_H$ , se získá rovnice:

$$\vartheta(T) - \vartheta_p = \int_{T_p}^T \lambda(T) \cdot dT = \frac{q_H}{4 \cdot \pi} \left( 1 - \frac{r^2}{r_u^2} \right) \quad [W \cdot m^{-1}], \quad (37.8)$$

kde  $\vartheta(T)$  [ $W \cdot m^{-1}$ ] je integrální tepelná vodivost, jejíž průběh se získá integrací součinitele tepelné vodivosti závislého na teplotě  $\lambda(T)$  [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]. [18,21]

Další komplikací ve výpočtech tvoří objemový vývin tepla  $q_v$ , jelikož není konstantní podél poloměru  $r$ . V průběhu vyhořívání palivo zachycuje epitermální neutrony, přednostně v blízkosti povrchu paliva, což vede ke zvýšení koncentrace  $^{239}Pu$  ve vnějším obvodu paliva. Ke konci kampaně má objemový vývin tepla  $q_v$  strmě rostoucí funkci, kde hodnota u okraje pelety se rovná 2 až 3 násobku střední hodnoty, viz graf na Obr. 3-5. [18]



Obr. 3-5 Objemový výkon tepla po poloměru pelety na začátku a na konci kampaně pro tlakovodní reaktory [18]

### 3.6 Součinitel tepelné vodivosti $\text{UO}_2$

Pelety z oxidu uraničitého  $\text{UO}_2$  jakožto keramický materiál mají poměrně nízký součinitel tepelné vodivosti. Jedná se o funkci závislou na teplotě, minima dosahuje kolem teploty 1 500 °C. V oblasti nižších teplot je vedení tepla realizováno pomocí fononů, což jsou kvazičástice (nejde tedy o skutečné částice) šířící vibrační kvantum v krystalové mřížce. Vliv tohoto způsobu přenosu tepla s rostoucí teplotou kontinuálně klesá. V oblasti vyšších teplot se postupně stává dominantní přenos tepla elektronovou vodivostí, rostoucí s teplotou.

#### 3.6.1 Fononová vodivost

Pro určení tohoto typu tepelné vodivosti je možno vyjít z elementární kinetické teorie plynů, kde je předpokládáno, že pevná látka se skládá z ideálního plynu, tvořeného fonony. Za takového předpokladu lze tepelnou vodivost psát jako: [18]

$$\lambda = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot c_v \cdot u \cdot l \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}], \quad (38.1)$$

kde  $\rho [kg \cdot m^{-3}]$  je hustota pevné látky,  $c_v [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je měrná tepelná kapacita při konstantním objemu,  $u [m \cdot s^{-1}]$  je rychlost fononu (přibližně rovnající se rychlosti zvuku v pevné látce), a  $l [m]$  je střední volná dráha fononu (nebo-li průměrná vzdálenost mezi dvěma po sobě následujícími srážkami).

Šíření tepla interakcí typu fonon-fonon je dán anharmonickými složkami vibrací krystalu. Mřížková anharmonicitu (odchylka systému od harmonické oscilace) roste s hmotnostním rozdílem mezi anionty a kationty v iontovém materiálu. Z kinetické teorie plynů plyne, že pro dokonalý krystal je střední volná dráha  $l$  rovna převrácené hodnotě termodynamické teploty  $1/T$ . Nicméně přítomnost bodových vad v pevné látce zabraňuje střední volné dráze fononu  $l$  nabývat vysokých hodnot v oblasti nízkých teplot. S uvažováním vlivu vad lze psát pro střední volnou dráhu fononu  $l$  vztah:

$$l = \frac{1}{A' + B' \cdot T} \quad [m] \quad (38.2)$$

Kde  $A'$  a  $B'$  jsou konstanty. Hodnota  $l$  nemůže nabývat hodnot menších než je vzdálenost mezi jednotlivými atomy  $\text{UO}_2$  v krystalové mříži ( $\sim 0,4$  nm). [18]

### 3.6.2 Radiační vodivost

Zvýšení tepelné vodivosti při teplotě nad 2 000 K pozorované při měření bylo při prvotních interpretacích vysvětlováno jako důsledek vlivu sdílení tepla sáláním. Tepelná vodivost  $\lambda_{rad}$  má tvar:

$$\lambda_{rad} = C \cdot T^3 \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (38.3)$$

Kde  $C$  je konstanta.

V dnešní době je však považován tento způsob vedení tepla za zanedbatelný, jelikož  $UO_2$  není propustný v IR oblasti natolik, aby vysvětloval zvýšení tepelné vodivosti. Tento nárůst při vysokých teplotách je převážně připisován elektronové vodivosti. [18]

### 3.6.3 Elektronová vodivost

V oblasti vysokých teplot je zvýšení součinitele tepelné vodivosti způsobeno zvýšením měrné tepelné kapacity  $UO_2$ . Oxid uraničitý  $UO_2$  je ve svém základním stavu Mott izolátor (skupina nevodivých materiálů, které by podle standardní pásové teorie měly být vodiči), který je charakterizován existencí lokalizovaných elektronů (elektrony vázány k příslušnému jádru), kde každý kationt má dva lokalizované 5f (5 – číslo slupky, f – značení podslupky) elektrony. Pro vytvoření polovodičových nosičů náboje (elektron, díra) je zapotřebí dodat energii  $U$  (tzv. Mott-Hubbardova mezera), která naruší základní nevodivý stav.

Při absenci jakýchkoli dalších interakcí se budou elektrony a díry volně pohybovat a přispívat k přenosu tepelné energie. Dvojice elektron-díra se nazývá "malý polaron". V reálném prostředí však dochází k rekombinaci nosičů náboje a situace se stává složitější.

Složka tepelné vodivosti způsobená těmito malými polarony úzce souvisí s odpovídající elektrickou vodivostí látky  $\sigma$ , která může být zapsána jako:

$$\sigma = e \cdot N_u \cdot (n \cdot \mu_n + h \cdot \mu_h) \quad [S \cdot m^{-1}] \quad (38.4)$$

Kde  $e$  [C] je elektronický náboj,  $N_u$  [ $m^{-3}$ ] je počet uranových iontů na jednotku objemu,  $n$  [–] a  $h$  [–] jsou dílčí koncentrace elektronů a děr, a  $\mu_n$  s  $\mu_h$  [ $m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$ ] respektuje jejich pohyblivost.

Elektronová tepelná vodivost  $\lambda_{el}$  je pak rovna:

$$\lambda_{el} = \left(\frac{U}{e}\right)^2 \cdot \frac{\sigma}{4 \cdot T} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (38.5)$$

Kde  $U$  [J] je aktivační energie pro tvorbu párů elektron - díra.

Po zjednodušení lze elektronovou tepelnou vodivost psát ve tvaru:

$$\lambda_{el} = \frac{C}{T^2} \cdot \exp\left(-\frac{Q}{T}\right) \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (38.6)$$

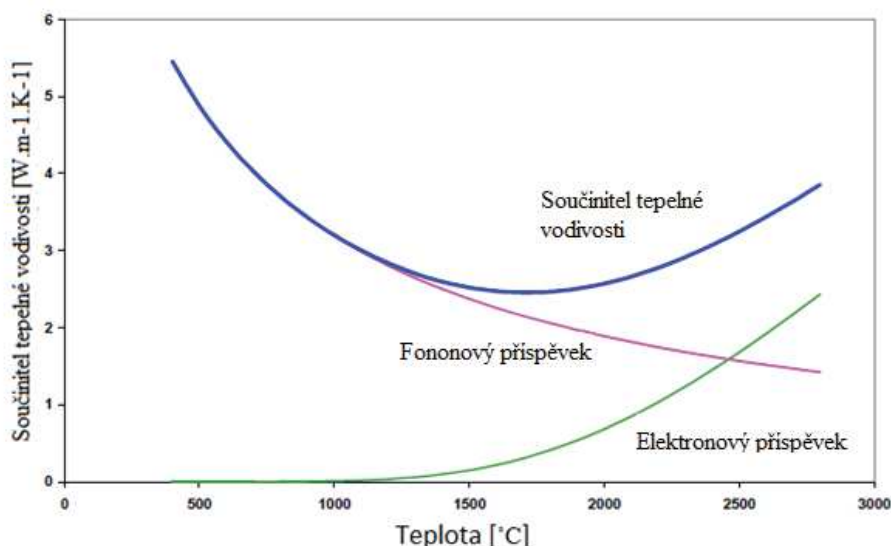
Kde  $C$  je konstanta a  $Q$  energie potřebná k aktivaci.

### 3.6.4 Stanovení součinitele tepelné vodivosti $\lambda_{UO_2}$

Existuje mnoho vzorců, jak určit součinitel tepelné vodivosti. Všechny vycházejí z experimentálních měření a většina publikovaných závislostí vykazuje dobrý souhlas především do teploty 1 600 °C. Experimentální určení součinitele tepelné vodivosti  $\lambda_{UO_2}$  je stanoveno podle:

$$\lambda = \alpha \cdot \rho \cdot c_p \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (38.7)$$

Kde  $\alpha [m^2 \cdot s^{-1}]$  je součinitel teplotní vodivosti,  $\rho [kg \cdot m^{-3}]$  je hustota látky a  $c_p [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je měrná tepelná kapacita. Do teplot kolem 1 300 °C je tepelná kapacita  $c_p$  měřena v DSC (Diferenciální skenovací kalorimetr). Tepelná vodivost se obvykle měří za pomoci laseru. Disk (průměr ~ 1 mm) se zahřeje na požadovanou teplotu, jedna z jeho stran obdrží tepelný impuls a oteplení druhé strany disku je registrováno pomocí pyrometru. Hodnota tepelné vodivosti je pak přímo odvozena od času potřebného k prostupu tepla diskem. [18]



Obr. 3-6 Závislost součinitele tepelné vodivosti  $UO_2$  na teplotě zahrnující Fononovou a Elektronovou vodivost [18]

### 3.7 Závislost součinitele tepelné vodivosti na porozitě

Z důvodu nedokonalosti výrobního postupu a také záměrným návrhem (za účelem vytvoření dutin pro zmírnění napuchání paliva způsobené produkty štěpení) nedosahují nikdy pelety 100% teoretické hustoty. Ve většině případů mají vyráběné pelety teoretickou hustotou kolem 95 %, avšak v některých případech může být hustota nižší, a to až 85 % teoretické hustoty. Dokonce i v případě pelet vyrobených s hustotou 95 % může nabývat vlivem ozáření paliva a shromažďování bublinek plyných produktů štěpení lokální porozita poměrně vysokých hodnot ( $\geq 20\%$ ).

Součinitel tepelné vodivosti oxidu uraničitého  $UO_2$  se snižuje s porozitou. Pro vysvětlení závislosti změny součinitele tepelné vodivosti na porozitě bylo předloženo mnoho studií. Dvě z nejpoužívanějších vyjádření tohoto vlivu jsou uvedena zde: [18]

- Loebův vztah 
$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 - \alpha \cdot P) \quad (38.9)$$

- Maxwell-Euckenův vztah 
$$\lambda = \lambda_0 \cdot \frac{1 - P}{1 + \beta \cdot P} \quad (38.10)$$

V rovnici 38.9 a 38.10 značí  $\lambda_0$  součinitel tepelné vodivosti oxidu se 100% teoretickou hustotou,  $\lambda$  součinitel tepelné vodivosti  $\text{UO}_2$  s porozitou  $P$  [-].  $\alpha$  a  $\beta$  jsou konstanty. Za předpokladu náhodně rozmístěné porozity s kulovými póry nabývají konstanty teoretických hodnot  $\alpha = 1$  a  $\beta = 0,5$ . Porovnání konstant  $\alpha$  a  $\beta$  s daty získanými při experimentálních měřeních stanovují hodnoty konstant s poměrně velkým rozptylem (od 1 po 4 pro  $\alpha$ ), avšak zpravidla vždy vyšší než teoretické hodnoty.

Rozdíl oproti teoretickým hodnotám je způsoben z následujících důvodů:

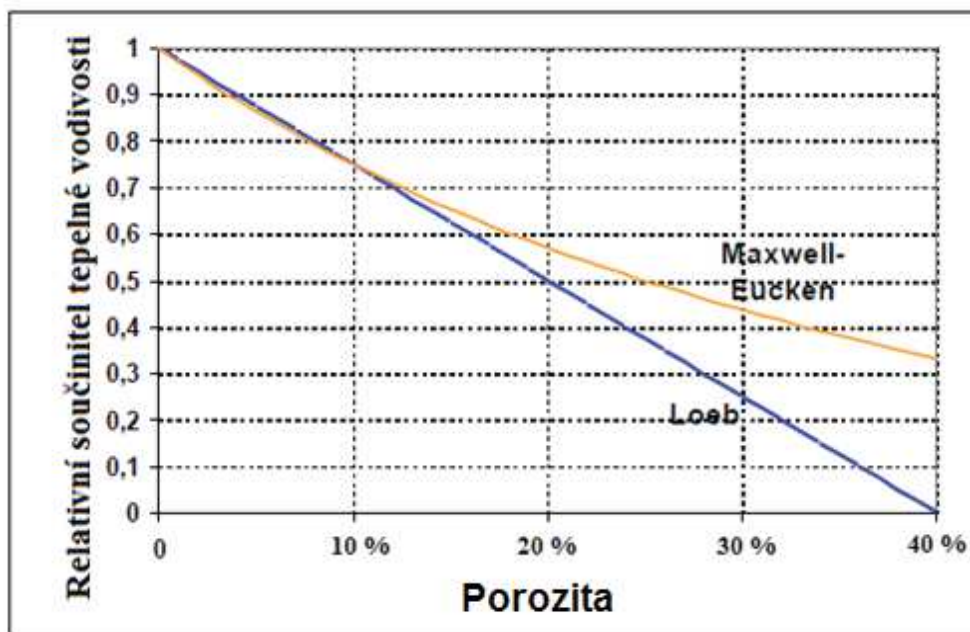
- Skutečný tvar pórů není dokonalá koule. Čím více se póry liší od čisté kulovitosti, tím vyšší jsou hodnoty koeficientů  $\alpha$  a  $\beta$ .
- Koeficienty  $\alpha$  a  $\beta$  budou klesat se zvyšující se teplotou, jelikož póry se zaplní plynnými produkty štěpení.
- U Loebova vztahu má koeficient  $\alpha$  tendenci klesat pro vysoké hodnoty porozity ( $\geq 10\%$ )

Na základě porovnání s mnoha měřeními mají nejlepší shodu tyto konfigurace konstant:

- Loebův vztah 
$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 - 2,5 \cdot P) \quad (38.9)$$

- Maxwell-Euckenův vztah 
$$\lambda = \lambda_0 \cdot \frac{1 - P}{1 + 2 \cdot P} \quad (38.10)$$

Oba výrazy poskytují téměř shodné výsledky až do hodnot kolem 10 % porozity. Maxwell-Euckenův vztah je vhodnější pro pokrytí velké škály porozity. [18]



Obr. 3-7 Změna součinitele tepelné vodivosti  $\text{UO}_2$  vlivem porozity [18]

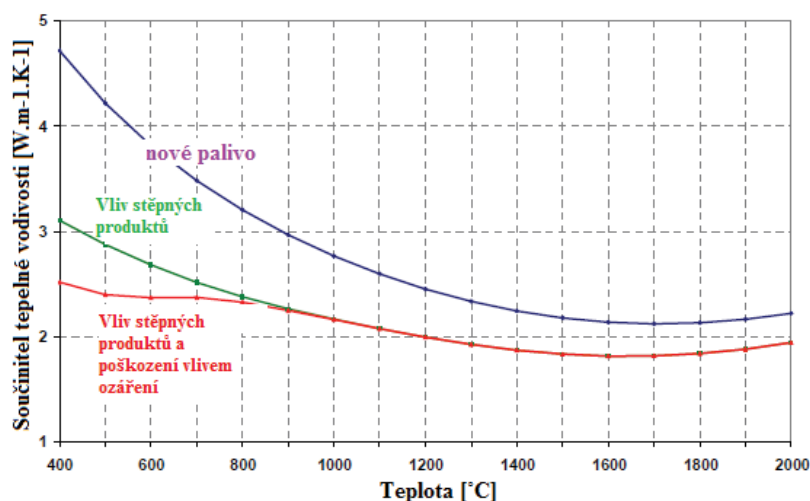
### 3.8 Vliv ozáření a vyhoření paliva na součinitele tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti ozářených pelet je podstatně nižší než součinitel tepelné vodivosti pelet nových. Tento účinek byl známý již dlouhou dobu, avšak jeho kvantifikace byla provedena poměrně nedávno a její přesnost stále dává prostor pro vylepšení.

První stanovení degradace tepelné vodivosti s vyhořením byly založeny na měření palivových pelet z  $\text{UO}_2$  s přísadami, které napodobují produkty štěpení obsažené ve vyhořelém palivu. Posouzením naměřených údajů v kombinaci s fyzikálními teoriemi je pro vysvětlení těchto jevů uvažováno hned několik typů degradačních efektů, které hrají roli především při relativně nízké teplotě v oblasti fononové vodivosti.

- Rozpuštěné pevné produkty štěpení hrají důležitou roli, jelikož ovlivňují tepelnou vodivost změnou struktury paliva. Každý atom produktů štěpení umístěný v krystalové mřížce působí jako bodová vada pro fononové šíření. Hmotnostní rozdíl a atomový poloměr jsou hlavními faktory ovlivňující změnu tepelné vodivosti.
- Vliv vysrážených produktů štěpení je pravděpodobně nižší, avšak pozitivní. Kovové částičky rozmístěné v palivu, mající tepelnou vodivost mnohem vyšší než  $\text{UO}_2$ , přispívají pozitivním vlivem ke změně tepelné vodivosti vyhořelého paliva.
- Atomy plyných produktů štěpení, které jsou samostatné nebo spojené v bublinách nanometrických velikostí, hrají významnou roli mající podobný vliv jako rozpuštěné pevné produkty štěpení. Když se plyny spojí do bublin mikrometrických velikostí, je jejich vliv podobný účinku pórovitosti. Obecně je tento vliv zahrnut do změny vlastností pelety vlivem změny pórovitosti.
- Vlivem neutronového toku,  $\alpha$ -rozpadu, a především vlivem záření vzniklého při štěpení fragmentů, roste celkový počet mřížkových vad, které snižují tepelnou vodivost paliva. Pokles vodivosti se zdá být na začátku ozáření velmi rychlý, po několika dnech se rychlost poklesu vyrovnává.

Obr. 3-8 ukazuje příslušné vlivy produktů štěpení a poškození způsobené ozářením na tepelnou vodivost pelety z  $\text{UO}_2$  o 95% teoretické hustotě ozářené při 60 GWd/t. Ukazuje se, že v oblasti nízkých teplot, okolo 600 °C, může být tepelná vodivost vyhořelého paliva oproti novému palivu nižší o 40 %. Při vyšších teplotách je degradace vodivosti nižší, avšak stále přítomná. [18]



Obr. 3-8 Vliv vyhoření a ozáření na  $\lambda$  pro palivo  $\text{UO}_2$  při vyhoření 60 GWd/tU [18]



## 4 ZPŮSOBY ZVYŠOVÁNÍ SOUČiniteLE TEPELNÉ VODIVOSTI PELET

Zvyšování součinitele tepelné vodivosti pelet je důležité z mnoha hledisek. Velikost součinitele tepelné vodivosti ovlivňuje rozložení teploty v peletě v radiálním směru, má vliv na praskání pelety, množství uvolňovaných plynných produktů štěpení a mikroskopickou i makroskopickou strukturu paliva. Jelikož oxid uraničitý ve formě keramického materiálu má v tomto ohledu nejhorší vlastnosti, je snahou mnoha bádání zlepšit jeho součinitel tepelné vodivosti.

Existuje mezinárodní shoda, na jejímž základě by odolnost paliv lehkovodních reaktorů proti těžkým nehodám měla být zvýšena. Existují mnohé koncepty nových paliv a palivových proutků, všechny však zahrnují zlepšení tepelné vodivosti a udržení produktů štěpení. S vyšší tepelnou vodivostí bude teplota pelety dosahovat nižších hodnot a zvýší se tak bezpečnostní teplotní rezerva pro přechodné děje.

V dnešní době existuje mnoho způsobů, jak k tomuto cíli dospět. Mezi nejslibnější způsob patří užití kompozitních paliv v kombinaci s materiály mající vysoký součinitel tepelné vodivosti. V průběhu let byla zkoumána paliva s příměsemi z celé řady materiálů, včetně uhlíku (ve formě grafitu, diamantu či nano-trubiček), kovů (např. Mo), keramických materiálů (např.  $\text{ThO}_2$ , SiC, a BeO) a dalších materiálů (např. UN). Keramicko-keramické kompozitní materiály jsou výhodné především pro svoji vysokou teplotu tání a chemickou stabilitu.

Kompozitní směsi s přídavkem  $\text{ThO}_2$  byly široce studovány po mnoho desetiletí, jelikož thorium je štěpitelný materiál. Nicméně tepelná vodivost oxidu thoričitého je jen o málo vyšší než  $\text{UO}_2$ , proto pro významné zlepšení je potřeba velkého objemového zastoupení  $\text{ThO}_2$ .

Karbid křemíku SiC a oxid berylnatý BeO se zdají být jedněmi z nejslibnějších materiálů, které projevují kompatibilitu s  $\text{UO}_2$  a mají zároveň vysokou tepelnou vodivost. [31]

### 4.1 Kompozitní palivo $\text{UO}_2$ -UN

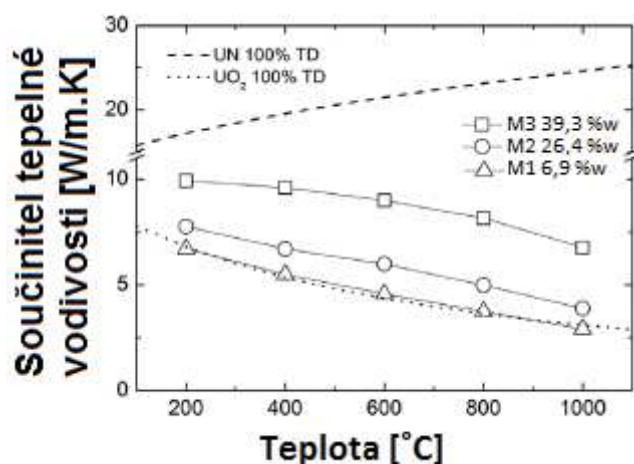
Nitrid uranu UN má ve srovnání s  $\text{UO}_2$  vysoký součinitel tepelné vodivosti (21,5 W/m.K při 600 °C), s vysokou hustotou (13,55 g/cm<sup>3</sup>, oproti  $\text{UO}_2$  vyšší o 40 %) a vysokou teplotou tání (2 600 °C) [23]. Díky zvýšené tepelné vodivosti může být teplota v ose pelety snížena až o několik set stupňů. V kombinaci se zvýšenou hustotou paliva lze pak teoreticky dosáhnout vyššího stupně vyhoření, delšího provozu a tím i snížení množství vyhořelého paliva. Použití nitridu uranu nicméně výrazně ovlivňuje jeho schopnost reakce s chladicí vodou, kdy při kontaktu (např. při porušení celistvosti pokrytí) ztrácí svoji strukturální integritu a dochází k vymytí a zanášení částeczek nitridu do primárního okruhu.

Pro využití UN v reaktorech je primárně nutné vyřešit zvýšení jeho odolnosti proti této reakci. Existuje několik návrhů pro snížení vodní koroze, především založené na vytvoření ochranné vrstvy (např. z  $\text{U}_3\text{Si}_2$  nebo  $\text{UO}_2$ ), kterou by byla obalena jednotlivá zrna a bránila by tak kontaktu s vodou.

Experimentální měření na kompozitním palivu složeného z  $\text{UO}_2$  a UN ukazují, že tepelná vodivost se výrazně zvyšuje se zvyšujícím se podílem nitridu uranu na složení pelety. Křivky součinitele tepelné vodivosti kompozitního paliva s různým obsahem UN vykazují podobný vývoj jako křivka součinitele tepelné vodivosti  $\text{UO}_2$ , kde se zvyšující se teplotou má součinitel tepelné vodivosti klesající charakter.

Vlivem praskání paliva však může dojít ke zničení ochranné vrstvy a tím pádem i vzniku cesty pro vodu či páru při případné poruše pokrytí. Z tohoto důvodu je třeba se v budoucím výzkumu zaměřit na stabilitu  $\text{UO}_2$ -UN kompozitních paliv při provozu v reaktoru a precizně ověřit, zda-li jsou pelety dostatečně odolné proti působícím vlivům a nedochází k porušení ochranné vrstvy.

Podobně jako i u ostatních kompozitních paliv závisí zvýšení tepelné vodivosti na procentuálním objemu přídavného materiálu a velikost hustoty je silně závislá na teplotě slinování. Pro srovnání jsou na Obr. 4-1 ukázány křivky součinitele tepelné vodivosti v závislosti na teplotě, kde nejvyšší nárůst součinitele tepelné vodivosti vykazuje vzorek M3 s 39% hmotnostním podílem UN, slinovaný při teplotě 1 590 °C. Ve srovnání s čistým  $\text{UO}_2$  vzrostla u vzorku M3 hustota o 13 % (10,91 g/cm<sup>3</sup>) a součinitel tepelné vodivosti v blízkosti průměrné provozní teploty pelety se zvýšil o 100 % (8,16 W/m.K při 800 °C). [23]



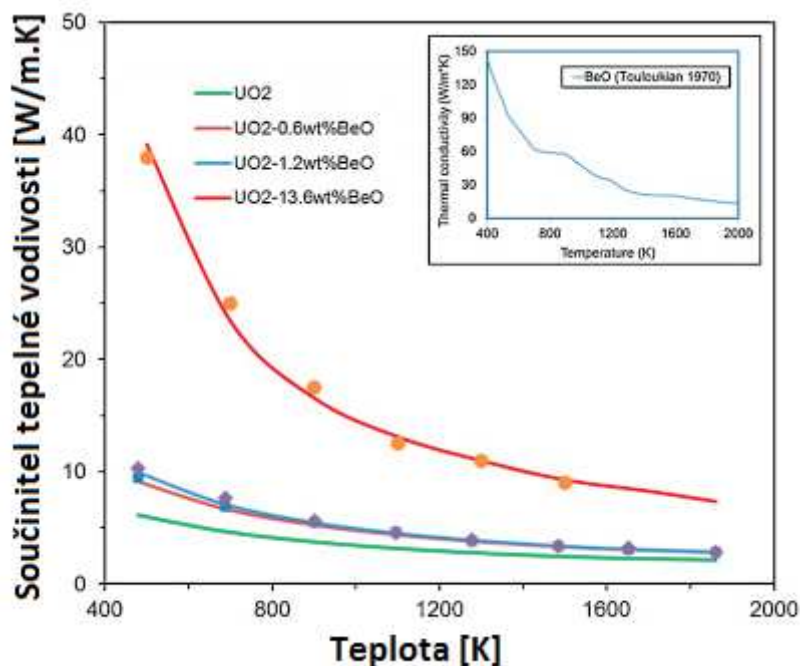
Obr. 4-1 Součinitel tepelné vodivosti jednotlivých vzorků a materiálů v závislosti na teplotě [23]

## 4.2 Kompozitní palivo $\text{UO}_2$ -BeO

Oxid berylnatý BeO má velmi vysoký součinitel tepelné vodivosti (370 W/m. K při 300 K) [24], vyšší než jiné známé keramiky a dokonce vyšší i než u většiny kovů, má vysoký bod tání (2 530 °C), avšak oproti  $\text{UO}_2$  relativně malou hustotu (3,01 g/cm<sup>3</sup>, více než 3x menší než  $\text{UO}_2$ ) [25]. Mezi další výhodné vlastnosti se řadí i malý účinný průřez pro zachyt neutronů s vysokou schopností jejich moderování. Je také vysoce rezistentní proti korozi. Všechny zmíněné vlastnosti činí z BeO materiál atraktivní pro jaderné energetické aplikace. Jedinou ze závažnějších negativních vlastností je jeho toxické působení na lidský organismus. Z tohoto důvodu jsou náklady na výrobu zvýšené, jelikož je nutné zabránit úniku a dbát zvýšené opatrnosti při manipulaci.

Podstatné pro vlastnosti paliva je homogenita směsi BeO a  $\text{UO}_2$ . Stejně jako u většiny kompozitních paliv, tak i  $\text{UO}_2$ -BeO závisí zvýšení součinitele tepelné vodivosti na % obsahu BeO, kde čím větší podíl, tím je součinitel tepelné vodivosti vyšší. Pro srovnání kompozitního paliva s čistým  $\text{UO}_2$  palivem jsou na Obr. 4-2 uvedeny součinitele tepelné vodivosti tří vzorků s různým % hmotnostním podílem BeO. [27]





Obr. 4-2 Součinitel tepelné vodivosti  $\text{UO}_2\text{-BeO}$  při různém % obsahu BeO [27]

Pro případ vzorku s 13,6% hmotnostním obsahem BeO se teplota v ose paliva sníží o 350 K, dokonce i s obsahem pouhých 0,6% dojde k významnému snížení, a to o 120 K. Z Obr. 4-2 je patrné, že největších rozdílů ve vodivosti dosahuje palivo při nízkých teplotách kolem 400 K. Průměrná provozní teplota paliva však dosahuje vyšších hodnot. Srovnáním součinitelů tepelné vodivosti při teplotě 1 000 K vykazuje křivka  $\text{UO}_2\text{-BeO}$  s 13,6% obsahem BeO zvýšení o 300 % oproti klasickému palivu z  $\text{UO}_2$ . [27]

V důsledku zvýšené tepelné vodivosti může oxid berylnatý přispět ke zvýšení vyhořívání stejně jako prodloužení provozní životnosti jaderného paliva. I když současné materiálové náklady na beryllium jsou pětikrát vyšší než u uranu, může mít použití kompozitního paliva  $\text{UO}_2\text{-BeO}$  hospodárný smysl. Z ekonomického zhodnocení vyplývá, že pro minimalizaci nákladů palivového cyklu se jeví nejvýhodněji procentuální podíl s hmotnostním obsahem 4,8% BeO, přičemž vyhoření by mělo být více než 60 MWd/kg. Jelikož je však cena beryllia proměnlivá, je nutné sledovat jeho vývoj a náklady na palivový cyklus pravidelně porovnávat. [26]

### 4.3 Kompozitní palivo $\text{UO}_2\text{-SiC}$

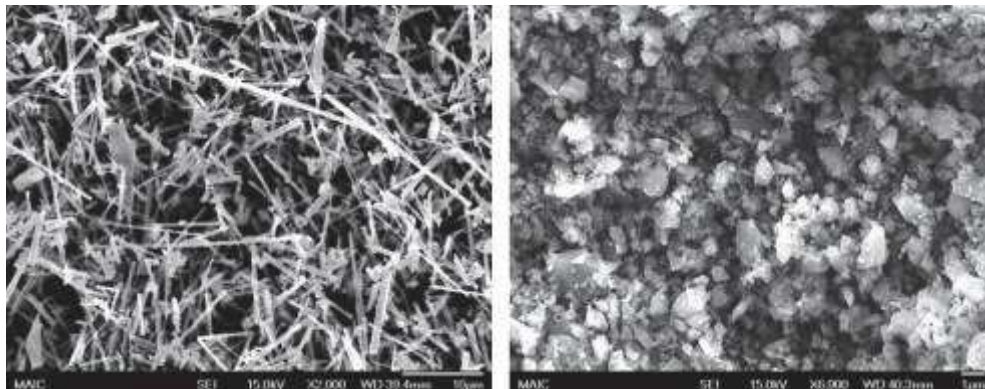
Karbid křemíku SiC vykazuje malý průřez pro zachyt neutronů, vysoký bod tání (2 973 °C) a velkou chemickou stabilitu (vysoká odolnost proti oxidaci na vzduchu a vlivem vlhkosti prostředí). Karbid křemíku  $\beta\text{-SiC}$  ( $\beta$  vyjadřuje strukturu krystalové mřížky) je izotropní a netoxický. Oproti  $\text{UO}_2$  má však výrazně menší hustotu (3,21 g/m<sup>3</sup>). [30]

Čistý SiC ve formě monokrystalu vykazuje při pokojové teplotě 300 K součinitel tepelné vodivosti 490 W/m.K. Nicméně, polykrystalický charakter SiC keramiky s poruchami krystalové mřížky nedosahuje tak vysokých hodnot součinitele tepelné vodivosti. Nejvyšší hodnoty při 300 K pro SiC keramiky se pohybují v rozmezí od 252 do 270 W/m.K. [29]

Při zkoumání vlastností paliva složeného z  $\text{UO}_2$  a SiC bylo zjištěno, že při teplotách nad 1370 °C dochází k chemickým reakcím, které mohou značně snižovat součinitel tepelné vodivosti kompozitu. Čím delší je doba slinování za vysokých teplot, tím více se umožňuje šíření

chemických látek a formování intermetalických a plyných produktů, např. CO nebo CO<sub>2</sub>. Zatímco intermetalické sloučeniny zvyšují vodivost, plyné produkty mohou bránit kontaktu UO<sub>2</sub>-SiC vytvářením dutin, což může způsobit výrazné snížení měrné tepelné vodivosti, mnohdy do takové míry, že výsledná měrná tepelná vodivost bude nižší než u pelet z čistého UO<sub>2</sub>. Pro výrobu kompozitního paliva UO<sub>2</sub>-SiC je tedy důležité zvládnout omezení těchto reakcí při slinování, například metodou Spark plasma sintering (SPS), která dobu slinování podstatně zkracuje.

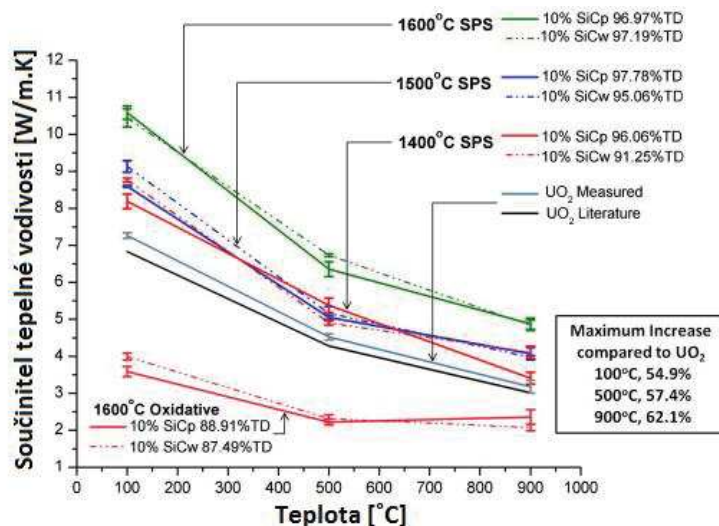
Karbid křemíku lze vyrobit ve dvou tvarech částic, a to buď jako vlákna - SiC whiskers (SiCw) nebo prachové částičky - SiC powders (SiCp). Srovnání tvaru lze nalézt na Obr. 4-3 a srovnání součinitele tepelné vodivosti kompozitních paliv obsahujících jednotlivé typy částic na Obr. 4-4.



Obr. 4-3 Ukázka tvaru částic SiC - nalevo vlákna, napravo prachové částičky [30]

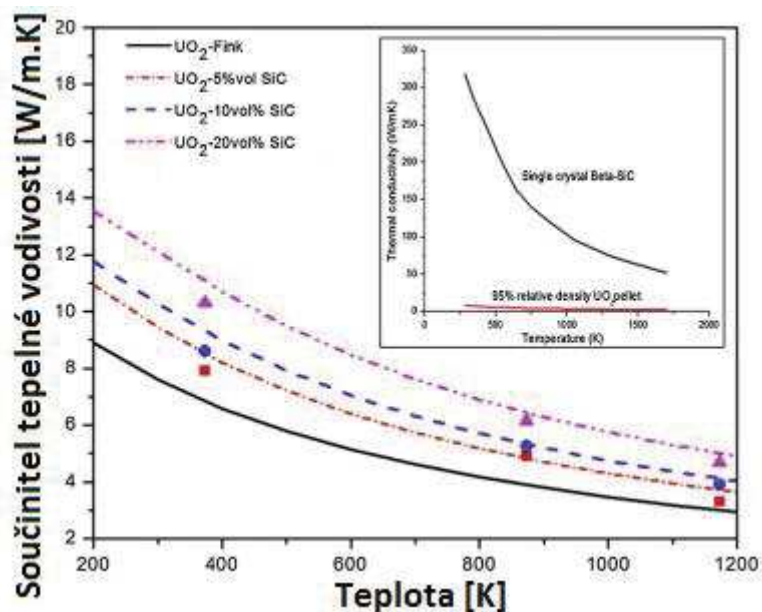
Obr. 4-4 reprezentuje měření součinitele tepelné vodivosti na několika vzorcích kompozitního paliva UO<sub>2</sub>-SiC. Obecně platí, že čím vyšší je teplota slinutí, tím roste i tepelná vodivost, avšak je důležité omezit chemické reakce mezi UO<sub>2</sub> a SiC. Maximální zvýšení součinitele tepelné vodivosti bylo pozorováno u UO<sub>2</sub>-SiC kompozitu slinovaného pomocí metody SPS při 1600 °C. Zde je zvýšení součinitele tepelné vodivosti oproti palivu z čistého UO<sub>2</sub> vyšší o 54,9 % (při teplotě 100 °C), 57,4 % (při teplotě 500 °C) a o 62,1 % (při teplotě 900 °C). Z naměřených hodnot vyplývá, že relativní zlepšení součinitele tepelné vodivosti roste s teplotou, avšak v absolutní míře nedokáže tento růst vykompenzovat její pokles, takže měrná tepelná vodivost vykazuje trend postupného snižování vodivosti s nárůstem teploty. V neposlední řadě výzkum prokázal, že rozdíly mezi měrnou tepelnou vodivostí paliva s vlákny a paliva s práškovým tvarem částic nejsou významné, tudíž na tvaru částic nezáleží. Spíše než na tvaru záleží především na velikosti zrn. [30]

Kompozitní pelety, které obsahují vyšší procentní zastoupení SiC, vykazují menší hustotu, vyšší součinitel tepelné vodivosti a větší měrnou tepelnou kapacitu. Na základě měření vzorků s různými velikostmi zrn karbidu křemíku bylo vyhodnoceno, že pro zvýšení součinitele tepelné vodivosti kompozitního paliva UO<sub>2</sub>-SiC se nejlépe hodí částice menší než 16,9 µm. Zvolením správně velikosti částic se potlačuje tendence vzniku mikro trhlin způsobené rozdílnou tepelnou roztažností. [28]



Obr. 4-4 Závislost součinitele tepelné vodivosti na teplotě a pro různé teploty slinování [30]

V případě kompozitního paliva  $\text{UO}_2\text{-SiC}$  s 20% objemem karbidu křemíku vykazuje snížení teploty středu paliva až o 150 °C a zvýšení součinitele tepelné vodivosti o 67 % při teplotě 1 000 K. [31]



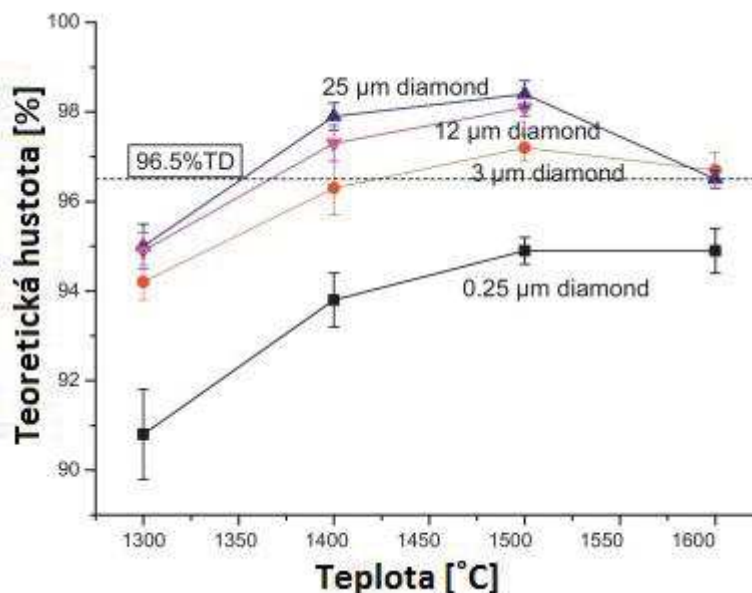
Obr. 4-5 Součinitel tepelné vodivosti  $\text{UO}_2\text{-SiC}$  v závislosti na % objemu SiC [31]

Před použitím v jaderných reaktorech je nutné prozkoumat všechny možné důsledky použití těchto palivových pelet. Reakce mezi  $\text{UO}_2$  a SiC lze urychlit v průběhu provozu zařízení, jelikož aktuální teplota jádra pelety může být vyšší, než je reakční teplota pro vytvoření chemických sloučenin. Další z působících vlivů je ozařování paliva, které zvyšuje difuzi obou chemických látek. Z těchto důvodů je třeba dalšího výzkumu pro určení reakčních produktů vytvářených v ozařovaném palivu v závislosti na provozních teplotách. [30]

#### 4.4 Kompozitní palivo $\text{UO}_2$ -diamant

Mezi všemi uvažovanými materiály má diamant nejvyšší součinitel tepelné vodivosti (asi 2 200 W/m.K při 300 K), což je nejvyšší hodnota jakéhokoli pevného materiálu. Mimo jiné je diamant díky svému uspořádání krystalové mříže odolný proti záření prostředí, jeví se proto jako ideální materiál pro kompozitní paliva z  $\text{UO}_2$ , přidávaný za účelem dosažení vyššího součinitele tepelné vodivosti paliva. Z ekonomického hlediska je cena synteticky vyrobených diamantových částic mnohem nižší (~\$ 2,5/g) než CNT (Carbon Nano Tubes) (~\$ 270/g) nebo grafenu (~\$ 125/g). Na druhou stranu v porovnání s cenou oxidu berylnatého BeO (~\$ 0,317/g) nebo celkově s cenou oxidu uraničitého  $\text{UO}_2$  (~\$ 0,064/g) je cena syntetického diamantu příliš vysoká. [26,32]

Pro zhodnocení potenciálu zkoumaného paliva je nutné pochopení potenciálních chemických reakcí mezi diamantem a  $\text{UO}_2$ , jelikož produkty chemických reakcí mohou silně ovlivnit tepelné a mechanické vlastnosti slinutých pelet. Z výsledků difraktometrie pro kompozit  $\text{UO}_2$ -diamant se 70% objemem diamantu, slinovaný při teplotě 1 300 °C, vyplývá, že kromě  $\text{UO}_2$  a diamantových špiček nebyly při analýze zpozorovány žádné další přítomné sloučeniny. Nicméně zvýší-li se maximální slinovací teplota na 1 400 °C, vzniká grafitu. Tvoření grafitu může být způsobeno grafitizací diamantu, i když tento jev nastává při teplotách nad 1 600 °C, avšak se zvyšujícím se tlakem proces grafitizace diamantu nastává za nižších teplot. Dosáhne-li maximální teplota slinování hodnot 1 500 °C, vytváří se kromě grafitu také karbid uranu (UC) a oxid uhelnatý CO, který vytváří dutiny v palivu a zvyšuje tak porozitu paliva. Je zřejmé, že vyšší teploty slinování nejsou vhodné, proto by proces výroby kompozitních pelet  $\text{UO}_2$ -diamant měl probíhat hluboko pod teplotou 1 500 °C, čímž se vylučuje možnost užití klasického oxidačního slinování probíhajícího při teplotách kolem 1 700 °C po dobu několika hodin. [32]

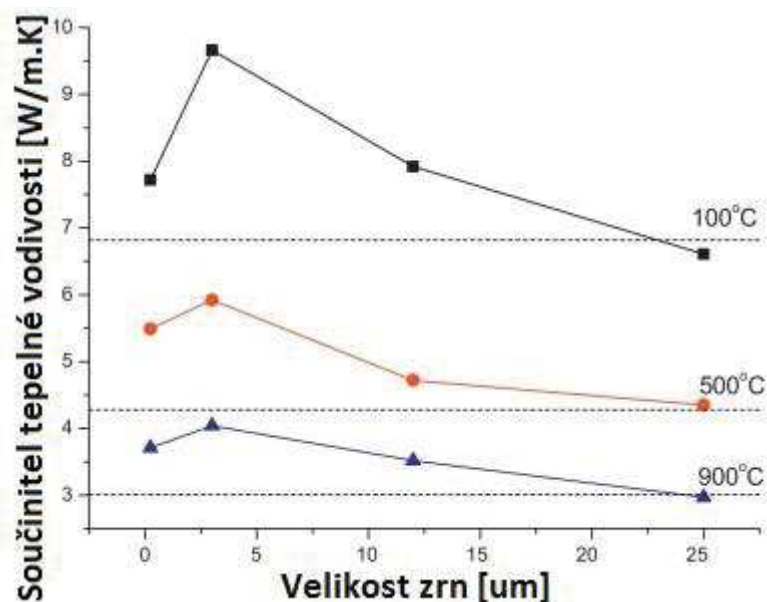


Obr. 4-6 Teoretická hustota kompozitního paliva v závislosti na teplotě slinování a velikosti částic diamantu [32]

Z Obr. 4-6 lze pozorovat, že při zvyšujících se velikostech částic diamantu klesá teplota slinování potřebná pro dodržení minimální teoretické hustoty paliv použitých v jaderných reaktorech. Při pozorování pod elektronovým mikroskopem lze vidět dobrý kontakt mezi částicemi diamantu a  $\text{UO}_2$  keramikou u pelet, které obsahují částice o velikosti 0,25 µm, 3 µm a 12 µm. U paliva s částicemi o velikosti 25 µm se objevují mikrotrhliny vzniklé kvůli neshodě koeficientů tepelné

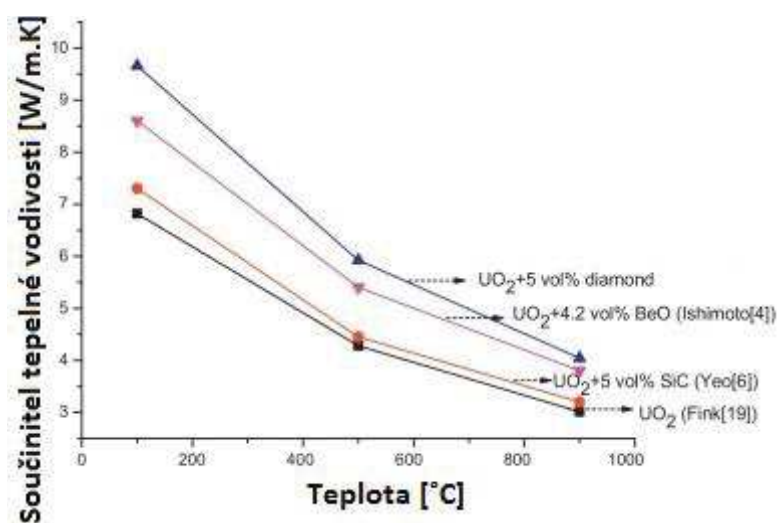


roztlačnosti mezi  $\text{UO}_2$  ( $1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  při 300 K) a diamantovými částicemi ( $93,93 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  při 300 K) [32]. I když se koeficient tepelné roztlačnosti mírně mění s teplotou, velké rozdíly mezi nimi existují při všech teplotách, a vzhledem k tomuto nesouladu jsou diamantové částice vystaveny velkému namáhání v tlaku během procesu ochlazování. Čím větší je velikost částic, tím větší napětí v tlaku působí na částice. Mikro-trhliny vznikají, překročí-li tahové napětí v  $\text{UO}_2$  kritickou hodnotu. Vzniklé mikro-trhliny nepříznivě ovlivňují tepelné a mechanické vlastnosti kompozitních pelet. Podobné jevy byly pozorovány u  $\text{UO}_2\text{-SiC}$  paliv.



Obr. 4-7 Vliv velikosti částic diamantu na vodivost kompozitního paliva [32]

Obr. 4-7 znázorňuje součinitel tepelné vodivosti  $\text{UO}_2$ -diamant kompozitního paliva slinutého při 1400 °C s různými velikostmi diamantových částic. Přerušované čáry představují tepelné vodivosti čistého  $\text{UO}_2$  při daných teplotách. Podle teoretických předpokladů by s rostoucí velikostí částic diamantu měla růst i tepelná vodivost, avšak vlivem mikrotrhlin tento závěr platí jen do určité míry. Na základě měření vyplývá, že za nejvýhodnější rozměr diamantových částic se jeví velikost 3  $\mu\text{m}$ , jelikož zvýšení součinitele tepelné vodivosti kompozitního paliva s 5% objemem částic diamantu je největší, a to o 41,6% (při teplotě 100 °C), 38,3% (při teplotě 500 °C) a 34,2% (při teplotě 900 °C). [32]



Obr. 4-8 Porovnání tepelné vodivosti jednotlivých kompozitních paliv s podobným % zastoupením [32]

Obr. 4-8 zobrazuje vývoj součinitele tepelné vodivosti s rostoucí teplotou, zároveň porovnává součinitele tepelné vodivosti UO<sub>2</sub>-diamant kompozitu s dalšími kompozity UO<sub>2</sub> na základě publikovaných měření. Hustoty těchto pelet nebyly normalizovány na stejnou hodnotu, avšak hodnoty se pohybují v rozmezí 96-98 % teoretické hustoty. Ze srovnání těchto kompozitních materiálů vyplývá, že UO<sub>2</sub>-diamant má nejvyšší tepelnou vodivost při daných měřených hodnotách. [32]



## 5 PROGRAM FEMAXI 6

Výpočetní program pro analýzu jaderného paliva lehkovodních reaktorů FEMAXI 6 je pokročilá verze, založena na dřívější verzi FEMAXI-V s funkční řadou vylepšení a rozšíření. Předěšlé verze programu FEMAXI-IV a V jsou především zaměřeny na chování středně vyhořelého paliva, kdežto FEMAXI 6 byl vytvořen za účelem zkoumání vysokého vyhoření palivových souborů při provozních podmínkách.

FEMAXI 6 nabízí kompletní řešení termické analýzy provázané s mechanickou analýzou. Program dále nabízí modely produkce štěpných plynů a detailnější analýzy v oblasti vyhoření. Bylo přidáno mnoho nových materiálových vlastností, především pro MOX paliva a paliva s příměsí Gadolinia Gd. Díky těmto vylepšením by měl být program schopen počítat kromě ustálených stavů i očekávané přechodné stavy.

Program FEMAXI, vytvářený agenturou JAEA (Japan Atomic Agency), vytváří analýzy pouze pro jeden palivový proutek během ustáleného provozu, případně při očekávaných přechodných dějích. Hlavní oblasti analýzy verze FEMAXI 6 jsou rozděleny do dvou částí. První jsou tepelné procesy, které určují rozložení teploty, a dále pak procesy související s mechanickými změnami. [33]

Tab. 5-1 Rozdělení oblasti analýzy programu FEMAXI 6 [33]

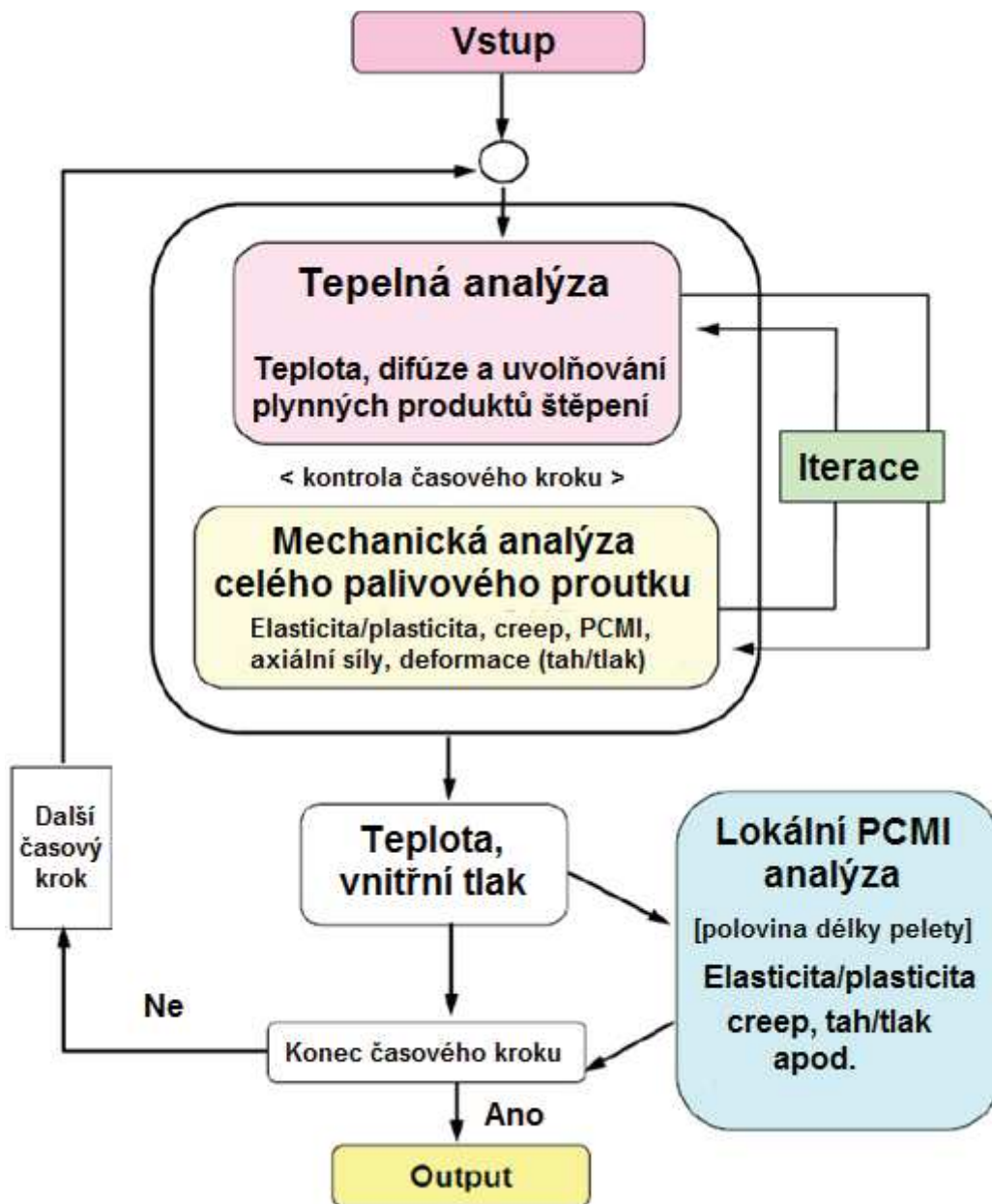
Segment	Tepelné procesy	Mechanické procesy
Peleta	Tepelná vodivost (distribuce tepelného toku) Uvolňování plynných produktů štěpení	Tepelná roztažnost, pružnost, plasticita, praskání, zhutňování, napuchání
Pokrytí	Tepelná vodivost Koroze	Tepelná roztažnost, pružnost, plasticita, radiační růst
Palivový proutek	Tepelná vodivost mezery (plynem, kontaktem, zářením), přenos tepla povrchem pokrytí, proudění plynu volným prostorem proutku	Mechanická interakce mezi peletou a pokrytím, tření, spojování

### 5.1 Struktura programu FEMAXI 6

Program FEMAXI 6 se skládá z 2 hlavních částí: první pro tepelnou analýzu a druhá pro mechanickou analýzu palivového proutku. Výpočet tepelné analýzy probíhá podél celého palivového proutku, který může být rozdělen na jednotlivé axiální segmenty (max. 40 segmentů). Pro určení rozložení teplot se k problému přistupuje jako k jednorozměrnému osově souměrnému výpočtu v radiálním směru, kde za pomoci takto získaných teplot se dále počítá množství vytvořených plynných produktů štěpení, jejich tok a vliv na tepelnou vodivost mezery mezi palivem a pokrytím. Do výpočtu se také zahrnují vlivy mezi jednotlivými axiálními úseky, které mohou vznikat v důsledku nerovnoměrného rozložení tepelného výkonu v axiálním směru.

Při mechanické analýze si uživatel může vybrat, zda bude uvažována celá délka proutku nebo jen jedna palivová peleta. Při výpočtech je používána metoda FEM (finite element method), nebo-li metoda konečných prvků. Díky symetričnosti pelety se do výpočtu zahrnuje pouze polovina pelety.

Mezi prvními údaji se při analýze určí hodnoty tepelné roztažnosti a zhutňování hmoty, které způsobují namáhání pelety. Dále probíhá výpočet praskání, elasticity/plasticity a tečení pelety, následované výpočtem namáhání kontaktu mezi peletou a pokrytím. Dojde-li ke změně mezi peletou a pokrytím, výpočty proběhnou znovu s novými hodnotami okrajových podmínek. Při zvolení metody výpočtu pro celý palivový proutek je samozřejmě do výpočtů zahrnut vliv axiálního tepelného výkonu, který působí na jednotlivé segmenty. Kromě zmíněného je také vyhodnocována i celková deformace palivového proutku podél její reálné výšky.



Obr. 5-1 Struktura programu FEMAXI 6 [33]

Tepelná část analýzy a mechanická část analýzy po celé délce palivového proutku jsou navzájem provázány, jelikož vliv vzájemného ovlivnění teplot a deformací je upravováno iterací v každém kroku. Jedná se o nejvýznamnější změnu ve struktuře programu FEMAXI 6 oproti jeho předchůdci FEMAXI V, ve kterém byla mechanická analýza zjednodušená a nebyla dostatečně provázána s částí tepelné analýzy. [33]

## 5.2 Vstupní soubor

K výpočtu v programu FEMAXI 6 je nutné nejprve napsat vstupní soubor. Jedná se o soubor obsahující vstupní parametry, volbu modelových rovnic, nastavení výstupů a vkládání časových bodů s příslušnou konfigurací parametrů provozu. Pro správný chod výpočtu je nutno dodržet předem definovaný počet znaků, počty mezer a odsazení, jelikož program je psaný v programovacím jazyce FORTRAN, který pracuje s každým jednotlivým znakem zvlášť. Celý vstupní soubor je pak rozdělen do 14 částí.

Popis jednotlivých částí vstupního souboru (viz. Obr. 5-2):

- Na začátku vstupního programu (řádek 1) je prostor pro popisek.
- Ve druhé části (2. – 23. řádek v ukázkovém vstupním souboru) probíhá výběr modelů a nastavování vybraných počátečních podmínek, jednotek a výstupů. Tato část začíná symbolem &INPUT a ukončená je symbolem &END. V této části se dá nastavit například výběr jednotek vstupních a výstupních hodnot, nastavení počátečních údajů (velikost zrn, pokojová teplota), nebo např. maximální čas výpočtu. Dále pak lze vybírat rovnice a modely pro výpočty ze zdrojového kódu, např. volba rovnic pro tepelnou vodivost, napuchání pelet, vodivosti mezery, difuzi plyných produktů štěpení peletou atd. V poslední řadě se definují způsoby a formát výstupů.
- Třetí část (nalézající se na řádku 24) je definování počtu axiálních segmentů (max. však 40) a číslo segmentu, pro který se počítá detailní analýza (od 1 do počtu axiálních segmentů).
- Čtvrtá část (řádek 25) určuje specifikace pokrytí, přesněji jeho materiál, vnitřní a vnější průměr.
- V páté části (řádek 26 až 35, počet řádků musí být stejný jako počet zadaných axiálních segmentů) jsou definovány vlastnosti jednotlivých pelet, jako je vybrání, zkosení hran, průměr centrálního otvoru, průměr pelety, délka pelety, míra obohacení  $^{235}\text{U}$ , teoretická hustota atd.
- Šestá část (řádek 36) se zadává jen v případě, jsou-li v palivovém proutku použité pelety s vybráním (na jedné nebo obou stranách, definuje se v páté části ve vlastnostech pelet). Zde se určuje průměr, hloubka a parametr vybrání.
- Sedmá část (v ukázkovém inputu na obr. 5-3 se nenalézá) je obdoba šesté části, avšak zde se nalézá specifikace zkosení hrany pelety, přesněji šířka a hloubka zkosení. Určení, zda-li peleta má či nemá zkosení hrany se provádí v části č. 5.
- Osmou částí (řádek 37) se definuje plynná výplň palivového proutku, přesněji horní a dolní objem pléna, počáteční tlak, počáteční složení plynné výplně a celková váha pelet.
- V části devět (řádek 38) se definuje počet bodů historie, jejich údaje se vypisují do části deset a jedenáct.
- Část deset (řádky 39, 43-49, 52-59, 62-66) nastavuje parametry, při kterých probíhalo měření údajů (tj. časové body). Jedná se o čas (v ukázce není zadán), vyhoření (jehož jednotka se volí v části jedna), lineární tepelný výkon tyče, tok rychlých neutronů

(v ukázce není zadán), teplota chladiva, tlak chladiva, nastavení přírůstku k časovému kroku (v ukázce není zadán), nastavení zobrazení měřených bodů ve výstupech (ano/ne), rychlost chladiva (jednotka se volí v části 2). Jelikož program přepočítává čas na vyhoření a naopak, zadává se pouze jeden z těchto dvou parametrů. Jsou-li zadane oba, parametr vyhoření je zanedbán. Při zadávání všech měřených časových bodů s jednotlivými parametry se pro každý bod historie části 10 a části 11 střídají. Nemění-li se zadané parametry (teplota chladiva, tlak chladiva a rychlost proudění chladiva), není nutné je již znovu zadávat.

- V jedenácté části (řádek 40-41, 50-51) jsou definované relativní tepelné výkony axiálních segmentů (počet segmentů definovaných v části tři). Na jeden řádek lze zadávat pouze osm výkonů. Je-li nastaveno více segmentů, pokračuje se na dalším řádku (v našem případě je nastaveno 10 segmentů, tj. poslední 2 jsou uvedeny na následujícím řádku). Platí-li zadané relativní tepelné výkony jednotlivých segmentů pro více časových bodů, napíše se na 70. pozici posledního řádku zadávaných relativních výkonů číslo, pro kolik časových bodů jsou tyto výkony neměnné.
- V části dvanáct (v souboru není uvedeno) je možné definovat relativní neutronový tok jednotlivých axiálních segmentů. Podmínkou je v části 2 vybrat příkaz IRFAI=1, neučiní-li se tak, je defaultně nastavena hodnota 0 a rozložení relativního neutronového toku je stejná jako rozložení relativního lineárního tepelného výkonu. Zadávání hodnot probíhá stejně jako v části 11, nemění-li se v jednotlivých časových bodech velikosti neutronových toků jednotlivých segmentů, lze na pozici 70. sloupce zapsat počet časových bodů, pro které to platí.
- Část třináct (v souboru není uvedeno) se zadává jen v případě, že by byla v části 10 nastavena hodnota příkazu IS=3, tj. že do výpočtu se má zahrnout vliv vnější teploty povrchu pokrytí. Zadávány jsou vnější teploty (v K) pokrytí jednotlivých segmentů, jejichž počet se zadává v části 3. Část třináct by byla vkládána hned za část 11, a to pokaždé, kdy je v části 10 zvolen parametr IS=3 (hodnoty teplot pokrytí nelze nastavit pro více časových bodů).
- Část čtrnáct (v souboru není uvedeno) se zabývá definováním relativní výkonové hustoty v radiálním směru. Definovat tuto část lze pouze v případě, je-li v části 2 vybrán a nastaven příkaz IFLX>0.
- Část patnáct (řádek 67) pak uzavírá definování vstupního souboru příkazem STOP. [33]



```

1 ***** PWR-type Rod Sample Case (June 2006) *****
2 &INPUT IBUNP=1, IDAY=1, IRH=1, TROOM=295.1, DTPL=0.0, ICORRO=2, PX=99.0,
3   PITCH=1.6, IPUGH=1, TLIM=1000., IFLX=-2, INPRD=2, RCORRO=0.3,
4   IRIM=1, RFGFAC=1.0, FRELOC=0.30, EPSRLZ=5.D-3, IFSNT=1, FAIW=5.E11,
5   IGRAIN=0, GR=10.0, GRWF=1.5, LBU=1, IPRO=0, R1=1.0, R2=1.0, ICAGRW=1,
6   IHOT=1, BETAX=0.02, ISPH=1, ICFL=1,
7
8   IFEMRD=1, IFEMOP=2, IDSELM=1, IDENSF=0, DMAX=2.0, FDENSEF=0,
9   IPEXT=14, IDCNST=1, IPTHCN=4, IFSWEL=4, ICPLAS=2,
10  IBOND=0, IGAPCN=5, BDX=100000., ALBD=0.7, FBONDG=10., SBONDG=0.01,
11  MAT3=2, FACT2=0.1, 0.1, 0.1, 100., 0.1,
12  CRPEQ=0, CRFAC=1.0, IPCRP=2, FCRFAC=1.0, IPTHEX=3, ATHEX=3.561D-6,
13  IRM=0, MESH=0, MOXP=0, IPLYG=1, IZYG=1, TCS=1773.15, IZOX=1, IST=1,
14
15  IPRINT=1,1,0,0,1, IPLOPT=5, DPBU=500.,
16  IWTHE=1,0,0,1,9*0,1,3*0, 3*1,
17  IWROD(1)=3*1, 8*0, 3*1, 0,0,0,1,0,0,
18  IDNO(1)=8*1, 6*0, 5*1, 20*0,
19  IDNO(41)=10*1, 0,1,1,0,1, 3*0,1, 4*0,1,1,0,1,1,5*0,1,3*0,1,0,1
20  IDNO(81)=1, 19*0,
21  IDNO(101)=1,0, 3*1,0,1, 3*0,1,0,1,1,0,1, 6*0,1, 8*0,1,1,0,0, 1,13*0,
22  IDNO(151)=2*0, 6*1, 3*0,1,1,0,1,0,1, 3*0,1,0,0,1,1, 4*0,1, 21*0,
23 &END
24      10      6
25      1      0.83      0.97
26      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
27      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
28      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
29      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
30      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
31      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
32      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
33      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
34      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
35      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
36  0.6218      0.021      0.0
37      8.0      1.0      1.0      0.0      0.0      0.0      550.0      0.0
38      22
39      0.0      .01      558.15      15.4      1      3.04
40  .620      .865      1.000      1.149      1.190      1.163      1.005      0.931
41  .786      .541
42      10.0      114.5
43      15000.0      250.0
44      20000.0      270.0
45      25000.0      290.0      1
46      28000.0      270.0
47      30000.0      260.0
48      30500.0      100.0
49      30501.0      1.0      1
50  .656      .903      1.098      1.167      1.201      1.174      1.073      0.959
51  .817      .581
52      30510.0      100.0
53      35000.0      200.0      1
54      40000.0      220.0
55      42000.0      210.0
56      46000.0      205.0
57      49000.0      190.0
58      50000.0      180.0
59      50010.0      6.0      1
60  .798      1.002      1.104      1.128      1.122      1.104      1.086      1.032
61  .912      .708      6
62      50110.0      170.0      1
63      52000.0      160.0
64      55000.0      150.0
65      57000.0      140.0
66      59900.0      110.0      558.15      15.4      1      3.04
67 STOP

```

### 5.3 Implementace nových modelů

Výpočetní program FEMAXI 6 ve své základní podobě neumožňuje kromě MOX paliva a paliva s příměsí gadolinia analýzu dalších druhů kompozitních paliv. Jelikož tato bakalářská práce se zabývá analýzou inovovaného jaderného paliva, tedy kompozitního paliva s příměsí mající vyšší měrnou tepelnou vodivost než  $\text{UO}_2$ , je zapotřebí upravit zdrojový kód výpočetního programu FEMAXI 6.

```

C
C PHCAP [J/kg.K]
C
  IF(IPRIM.EQ.0)THEN
    GOTO 101
  ELSE IF(IPRIM.EQ.1) THEN
C   PHSIC [J/kg.K]
    IF (TK.GE.200. .AND. TK.LE.2400.) THEN
      PHCSIC = 925.65+(0.3772*TK)-(7.9259D-5*TK**2)-(3.1946D7/TK**2)
    ELSE IF (TK.GE.2400. .AND. TK.LE.2800.) THEN
      PHCSIC = 1365.54238+(1.379D-3*TK)
    END IF
C   theoretical density: UO2 = 10.96 [g/cm3] SiC = 3.21 [g/cm3]
    WSIC = (VPRIM*3.21)/
1    (((1.0-VPRIM)*FDEN*10.96)+(VPRIM*3.21))
    PHCAP = PHCAP*(1-WSIC)+PHCSIC*WSIC
  END IF
C
101 CONTINUE
C
  RETURN
END

```

Obr. 5-3 Ukázka implementace rovnic do zdrojového kódu FEMAXI 6

Na Obr. 5-3 lze vidět ukázkou implementace materiálových rovnic do zdrojového kódu FEMAXI 6, přesněji výpočet tepelné kapacity kompozitního paliva s příměsí SiC. Celý výpočet této proměnné je založen na podmínce, jakou hodnotu nabývá proměnná IPRIM, jejíž hodnota se definuje ve vstupním souboru. Nabývá-li proměnná IPRIM hodnotu 0, jedná se o palivo z čistého  $\text{UO}_2$ , celý zobrazený výpočet se díky příkazu GOTO přeskočí, proměnná PHCAP, reprezentující měrnou tepelnou kapacitu paliva, se nezmění a nabývá hodnoty vypočtené jedním ze zvolených modelů výpočtu měrné tepelné kapacity paliva z čistého  $\text{UO}_2$  nacházející se před touto vloženou úpravou zdrojového kódu. Je-li proměnná IPRIM rovna 1, jedná se o palivo s příměsí SiC, na základě uvedených materiálových rovnic se vypočte měrná tepelná kapacita SiC a dále pak na základě hodnoty proměnné VPRIM (reprezentující objemový podíl příměsi a zadávaný též ve vstupním souboru) dojde k výpočtu měrné tepelné kapacity kompozitního paliva.

Celý zdrojový kód je napsán v programovacím jazyce FORTRAN. Pro převedení zdrojového kódu do spustitelného .exe souboru slouží např. program Intel® Parallel Studio XE Cluster Edition for Windows 2017 (nástavba programu Microsoft Visual Studio), která fortranovský zdrojový kód zkompiluje a vytvoří spustitelný program. Práce s tímto upraveným programem je pak stejná jako tomu bylo u původní neupravené verze.



## 6 PRAKTICKÁ ČÁST

Účelem této bakalářské práce je upravit zdrojový kód výpočetního programu FEMAXI 6 a umožnit tím tak analýzu inovovaného jaderného paliva. Jako výchozí zdroj k této úpravě byl zvolen článek „*Multiphysics modeling of UO<sub>2</sub>-SiC composite fuel performance with enhanced thermal and mechanical properties*“ [31], ze kterého byly přejaty rovnice materiálových vlastností a rovnice popisující vliv příměsi na vlastnosti paliva, vesměs založené na objemovém (obsahovém) poměru materiálů (kap. 6.1). Dále následuje popis materiálových rovnic jednotlivých složek kompozitu (kap. 6.2). Jakmile byl zkompileován upravený výpočetní program a následně vytvořen vstupní soubor popisující geometrii modelovaného palivového proutku (kap. 6.3) včetně volby fyziky chování samotného paliva, bylo přistoupeno k porovnávání výsledků.

Kapitola 6.4 pojednává o srovnání výsledků jednotlivých výpočetních programů (CAMPUS, FRAPCON, BISON, ABAQUS) dle [31] s upraveným programem FEAMXI 6. Všechny výpočetní programy modelují tentýž palivový prutek obsahující pelety z čistého UO<sub>2</sub>, jehož specifikace jsou uvedeny v kap. 6.3 i v článku [31]. Následující kapitola 6.5 zobrazuje sledované parametry v závislosti na zvyšujícím se podílu procentuálního zastoupení příměsi SiC, tentokrát generované již jen programy CAMPUS a FEMAXI 6, čímž je umožněno srovnání obou výpočetních programů včetně vlivu a trendů souvisejících se zvyšováním procentního podílu příměsi.

Po posouzení generovaných výsledků téhož modelovaného proutku a rozdílů mezi nimi, způsobené rozdílnou metodou vnitřních výpočtů fyziky chování paliva, bylo přistoupeno k modelování proutku dle parametrů paliva Gd-2M užívaného v JE Dukovany. Parametry modelovaného proutku jsou uvedeny v kapitole 6.6. Dále kromě modelování reálného proutku bylo přistoupeno i k druhotné úpravě zdrojového kódu programu FEMAXI 6 tak, aby materiálové rovnice jednotlivých složek kompozitního paliva v něm obsažené lépe vystihovaly vlastnosti chování průmyslově dostupných materiálů pro reálnější výpočty.

V neposlední řadě v kapitole 6.7 lze nalézt samotnou analýzu možného kompozitního paliva pro JE Dukovany. S přihlédnutím na specifikace a podmínky provozu paliva v AZ byla provedena analýza inovovaného jaderného paliva, vlivu příměsi na jednotlivé sledované parametry a zhodnocení vlastností zmíněného paliva.

### 6.1 Rovnice popisující materiálové vlastnosti kompozitu

Jelikož kompozitní palivo bude mít velký objemový podíl UO<sub>2</sub>, lze pro rozumný prvotní popis vlastností kompozitního paliva užít rovnic uvedených níže. Pro přesné posouzení chování by bylo nutné, na základě měření v reaktoru a na ozářeném kompozitním palivu, vyvinout a zdokonalit modely, které by odpovídaly reálnému vlivu dané příměsi, tedy v případě této studie příměsi SiC.

Pro součinitel tepelné vodivosti kompozitního paliva byl vybrán model Hasselmana a Johnsona, který je popsán rovnicí [31]:

$$\lambda_{UO_2-SiC} = \lambda_{UO_2} \cdot \frac{2 \cdot \left( \frac{\lambda_{SiC}}{\lambda_{UO_2}} - \frac{\lambda_{SiC}}{a \cdot h_c} - 1 \right) + \frac{\lambda_{SiC}}{\lambda_{UO_2}} + 2 \cdot \frac{\lambda_{SiC}}{a \cdot h_c} + 2}{\left( 1 - \frac{\lambda_{SiC}}{\lambda_{UO_2}} + \frac{\lambda_{SiC}}{a \cdot h_c} \right) \cdot V_p + \frac{\lambda_{SiC}}{\lambda_{UO_2}} + 2 \cdot \frac{\lambda_{SiC}}{a \cdot h_c} + 2} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}], \quad (61.1)$$

kde  $\lambda [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$  je součinitel tepelné vodivosti,  $V_p [-]$  je objemový poměr příměsi,  $a [m]$  je poloměr částice příměsi a  $h_c [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$  měrná tepelná vodivost rozhraní částice-matrice (interfacial thermal conductance).

Měrná tepelná kapacita kompozitního materiálu je kombinací hmotnostního podílu dané složky vynásobeného měrnou tepelnou kapacitou příslušné složky, tedy měrnou tepelnou kapacitou  $UO_2$  a měrnou tepelnou kapacitou  $SiC$  [31]:

$$c_{p_{UO_2-SiC}} = W_{UO_2} \cdot c_{p_{UO_2}} + W_{SiC} \cdot c_{p_{SiC}} \quad [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}], \quad (61.2)$$

kde  $c_p [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je měrná tepelná kapacita a  $W [-]$  je hmotnostní poměr dané složky ku celkové hmotnosti.

Vztah mezi hmotnostním podílem a objemovým podílem je následující [31]:

$$W_{UO_2} = \frac{V_{UO_2} \cdot \rho_{UO_2}}{V_{UO_2} \cdot \rho_{UO_2} + V_{SiC} \cdot \rho_{SiC}}; W_{SiC} = \frac{V_{SiC} \cdot \rho_{SiC}}{V_{UO_2} \cdot \rho_{UO_2} + V_{SiC} \cdot \rho_{SiC}} \quad [-], \quad (61.3)$$

kde  $V [-]$  je objemový poměr dané složky ku celkovému objemu a  $\rho [kg \cdot m^{-3}]$  je jeho hustota. Pro  $\rho_{SiC}$  se počítá s hodnotou 3 210  $[kg \cdot m^{-3}]$  [47]

Obdobně lze vypočítat výslednou hustotu, Youngův modul pružnosti  $E [Pa]$ , Poissonovu konstantu  $\nu [-]$  a měrnou tepelnou roztažnost  $\frac{\Delta L}{L} [K^{-1}]$ , kde výsledné hodnoty jsou zde dány objemovým podílem [31]:

$$\rho_{UO_2-SiC} = V_{UO_2} \cdot \rho_{UO_2} + V_{SiC} \cdot \rho_{SiC} \quad [g \cdot cm^{-3}] \quad (61.4)$$

$$E_{UO_2-SiC} = V_{UO_2} \cdot E_{UO_2} + V_{SiC} \cdot E_{SiC} \quad [Pa] \quad (61.5)$$

$$\nu_{UO_2-SiC} = V_{UO_2} \cdot \nu_{UO_2} + V_{SiC} \cdot \nu_{SiC} \quad [-] \quad (61.6)$$

$$\frac{\Delta L}{L}_{UO_2-SiC} = V_{UO_2} \cdot \frac{\Delta L}{L}_{UO_2} + V_{SiC} \cdot \frac{\Delta L}{L}_{SiC} \quad [K^{-1}] \quad (61.7)$$

Jelikož však program FEMAXI 6 počítá měrnou tepelnou roztažnost jakožto přírůstek hodnoty mezi dvěma dílčími kroky  $n$  a  $n-1$ , je nutné rovnici (61.7) přepsat do tvaru:

$$\left( \frac{\Delta L}{L}_{n-1} - \frac{\Delta L}{L}_n \right)_{UO_2-SiC} = V_{UO_2} \cdot \left( \frac{\Delta L}{L}_{n-1} - \frac{\Delta L}{L}_n \right)_{UO_2} + V_{SiC} \cdot \left( \frac{\Delta L}{L}_{n-1} - \frac{\Delta L}{L}_n \right)_{SiC} \quad [K^{-1}] \quad (61.8)$$

## 6.2 Rovnice materiálových vlastností pro data JE Dukovany

V kapitole 6.1 lze nalézt popis, jakým lze vypočítat základní vlastnosti kompozitního paliva. V této kapitole se nachází již samotné rovnice popisující materiálové vlastnosti jednotlivých složek modelovaného paliva, tj. vlastnosti oxidu uraničitého  $UO_2$  a vlastnosti karbidu křemíku  $SiC$ . Zobrazené materiálové rovnice jsou uvedeny pro případ druhotné úpravy zdrojového kódu, kdy se analyzovalo možné kompozitní palivo provozovatelné v reaktoru JE Dukovany. Materiálové rovnice popisující základní vlastnosti jednotlivých složek implementované v prvotní úpravě zdrojového kódu, jež umožnily následné porovnání výpočetních programů, jsou uvedeny v článku [31].

### 6.2.1 Vlastnosti UO<sub>2</sub>

Všechny materiálové vlastnosti pro UO<sub>2</sub> v upraveném kódu lze volit libovolně, nezávisle na volbě příměsi a jejím procentuálním zastoupení. Při prvotní úpravě zdrojového kódu programu FEMAXI 6 (pro porovnání výsledků s programem CAMPUS v [31]) byly implementovány materiálové rovnice udávané v článku [31], vesměs pro UO<sub>2</sub> shodné s materiálovými rovnicemi, které jsou již v kódu obsažené. Při druhotné úpravě zdrojového kódu (pro výpočet dat JE Dukovany) byly materiálové rovnice pro UO<sub>2</sub> ponechány neměnné. Jejich vyjádření i označení, pod nimiž je lze najít v manuálu FEMAXI 6 a zadat do vstupního souboru, jsou uvedeny níže.

- Součinitel tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti UO<sub>2</sub> je reprezentován modelovou rovnicí Lucuty, Matzkeho & Hastingsse [33]:

$$\lambda_{UO_2} = K_d \cdot K_{1P} \cdot K_{2P} \cdot K_r \cdot \lambda_0 \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}], \quad (62.1)$$

$$\lambda_0 = \frac{1}{0,0375 + 2,165 \cdot 10^{-4} \cdot T} + \frac{4,715 \cdot 10^9}{T^2} \cdot \exp\left(-\frac{16\,361}{T}\right) \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}], \quad (62.2)$$

$$K_d = \left( \frac{1,09}{\beta^{3,265}} + \frac{0,0643}{\sqrt{\beta}} \cdot \sqrt{T} \right) \cdot \arctan\left( \frac{1}{\frac{1,09}{\beta^{3,265}} + 0,0643 \cdot \sqrt{\frac{T}{\beta}}} \right), \quad (62.3)$$

$$K_{1P} = 1 + \frac{0,019 \cdot \beta}{(3 - 0,019 \cdot \beta)} \cdot \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{-(T - 1\,200)}{100}\right)} \quad (62.4)$$

$$K_{2P} = \frac{1 - P}{1 + 0,5 \cdot P} \quad (62.5)$$

$$K_r = 1 - \frac{0,2}{1 + \exp\left(\frac{T - 900}{80}\right)} \quad (62.6)$$

kde  $T$  [K] je teplota,  $\beta$  je % vyhoření na atom =  $1,067 \cdot 10^{-4} \cdot Bu$ ,  $Bu$  [MWd/tU] je vyhoření a  $P$  [–] je porozita.

Tento model je ve vstupním souboru volen parametrem IPTHCN=10.

- Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita  $c_{p_{UO_2}} [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je reprezentována modelovou rovnicí MATPRO-11 [33]:

$$c_{p_{UO_2}} = \frac{296,7 \cdot \theta^2 \cdot \exp\left(\frac{\theta}{T}\right)}{T^2 \cdot \left[\exp\left(\frac{\theta}{T}\right) - 1\right]^2} + 0,0243 \cdot T + \left(\frac{O}{M}\right) \cdot \frac{8,745 \cdot 10^7 \cdot E_D}{R \cdot T^2} \cdot \exp\left(\frac{-E_D}{R \cdot T}\right), \quad (62.7)$$

kde  $\theta [K]$  je Einsteinova teplota (pro  $UO_2$  je  $\theta = 535,285 K$ ),  $O/M [-]$  je stechiometrický poměr kyslíku a uranu (udává výrobce paliva),  $E_D [J \cdot mol^{-1}]$  je aktivační energie potřebná pro vznik Frenkelových poruch (pro  $UO_2$  je  $E_D = E_D 1,577 \cdot 10^5 J \cdot mol^{-1}$ ) a  $R [J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}]$  je univerzální plynová konstanta ( $R = 8,315 J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ ).

Tento model je ve vstupním souboru volen parametrem ISPH=1.

- Měrná tepelná roztažnost

Měrná tepelná roztažnost  $UO_2$  je reprezentována modelovou rovnicí Martina [33]:

$$\frac{\Delta L}{L} = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3 \quad [K^{-1}], \quad (62.8)$$

kde pro jednotlivé konstanty<sup>1</sup> dle [33] platí:

$$T \leq 923 K: a = -2,66 \cdot 10^{-3}, b = 9,802 \cdot 10^{-6}, c = -2,705 \cdot 10^{-10}, d = 4,391 \cdot 10^{-13}$$

$$T > 923 K: a = -3,28 \cdot 10^{-3}, b = 1,179 \cdot 10^{-5}, c = -2,429 \cdot 10^{-9}, d = 1,219 \cdot 10^{-12}$$

Avšak jelikož program FEMAXI 6 počítá s přírůstkem měrné tepelné roztažnosti mezi časovými kroky  $n$  a  $n-1$ , je nutné rovnici 64.8 přepsat do tvaru:

$$\left(\frac{\Delta L}{L_{n-1}} - \frac{\Delta L}{L_n}\right)_{UO_2} = (a + b \cdot T_{n-1} + c \cdot T_{n-1}^2 + d \cdot T_{n-1}^3) - (a + b \cdot T_n + c \cdot T_n^2 + d \cdot T_n^3), \quad (62.9)$$

kde  $T_n [K]$  značí teplotu paliva současného kroku a  $T_{n-1} [K]$  teplotu paliva kroku předešlého.

Tento model je ve vstupním souboru volen parametrem IPTHEX=6.

Za účelem snahy implementovat do programu všechny materiálové rovnice  $UO_2$  uvedené v článku [31] jsou následující rovnice vepsány do kódu pod příslušným označením umožňující jejich volbu:

- Youngův modul pružnosti v tahu

Youngův modul pružnosti v tahu  $UO_2$  je reprezentován modelovou rovnicí Martina [31]:

$$E_{UO_2} = 2,334 \cdot 10^{11} \cdot [1 - 1,091 \cdot 10^{-4} \cdot T^{-1,34} \cdot \exp(-1,34)] \quad [Pa] \quad (62.10)$$

Tento model je ve vstupním souboru volen parametrem IPLYG=3.

<sup>1</sup> Hodnoty konstant se v [33] liší od [31], avšak dle [53] jsou konstanty v [33] platné

- Poissonova konstanta

Poissonova konstanta  $UO_2$  je reprezentována modelovou rovnicí Martina [31]:

$$\nu_{UO_2} = 0,316 + (0,5 - 0,316) \cdot \frac{(T - 300)}{2\,800} \quad [-] \quad (62.11)$$

Tento model je ve vstupním souboru volen parametrem IPOIS=2.

- Teoretická hustota

Poslední zmíněnou rovnicí popisující vlastnosti  $UO_2$  je model teoretické hustoty, který v původním zdrojovém kódu zcela chyběl a teoretická hustota vyjadřovala konstantu nezávislou na teplotě ( $\rho_{UO_2} = 10,96 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ). Modelová rovnice je do výpočetního kódu implementována bez možnosti výběru, tj. teoretická hustota  $UO_2$  je nově veličina proměnná s teplotou.

Hustota  $UO_2$  je reprezentována modelovou rovnicí Finka [31]:

$$\rho_{UO_2} = 10,97 \cdot (a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3)^{-3} \quad [\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}], \quad (62.12)$$

kde pro jednotlivé konstanty dle [31] platí:

$$T \leq 923 \text{ K}: a = 0,99734, b = 9,802 \cdot 10^{-6}, c = -2,705 \cdot 10^{-10}, d = 4,391 \cdot 10^{-13}$$

$$T > 923 \text{ K}: a = 0,99672, b = 1,179 \cdot 10^{-5}, c = -2,429 \cdot 10^{-9}, d = 1,219 \cdot 10^{-12}$$

## 6.2.2 Vlastnosti SiC

Modely vlastností karbidu křemíku SiC nelze volit stejně jako u  $UO_2$ , ve zdrojovém kódu jsou rovnice implementovány bez možnosti další volby. Volba druhu příměsi závisí na hodnotě proměnné IPRIM zadávané ve vstupním souboru, kde IPRIM =0 představuje volbu bez příměsi a IPRIM =1 reprezentuje příměs SiC. K problematice bylo již od počátku přistupováno tak, aby v budoucnu bylo možno snadno opětovně modifikovat zdrojový kód programu FEMAXI 6 a umožnit tak výpočet i pro jiný druh příměsi implementováním rovnic závislých na volbě IPRIM větší nebo rovno 2.

- Součinitel tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti SiC je reprezentován modelovými rovnicemi založenými na výzkumu vedoucího této práce [52]:

$$\lambda_{SiC} = \frac{\lambda_{SiC_{nonirr}}}{R_{SiC_{irr}} \cdot \lambda_{SiC_{nonirr}} + 1} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}], \quad (62.13)$$

kde  $R_{SiC_{irr}} [m \cdot K \cdot W^{-1}]$  je součinitel vyjadřující degradaci měrné tepelné vodivosti SiC pod vlivem neutronového ozáření a  $\lambda_{SiC_{nonirr}} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$  součinitel tepelné vodivosti neozařeného karbidu křemíku SiC.

Pro  $R_{SiC_{irr}}$  [ $m \cdot K \cdot W^{-1}$ ] platí:

$$R_{SiC_{irr}} = 0,3168 \cdot \left[ 1 - \exp\left(\frac{-3980 \cdot \frac{Bu}{EFPY} \cdot \frac{DPA}{EFPY}}{1 + 2,983 \cdot T}\right) \right] \cdot \exp(-0,0017 \cdot T), \quad (62.14)$$

kde  $Bu$  [ $MWd/tU$ ] je vyhoření,  $DPA$  [–] je průměrný počet posuvů atomů pod vlivem srážek s neutrony při ozařování a  $EFPY$  [ $MWd/tU$ ] je efektivní výkon při plném ročním provozu (Effective Full Power Year). Hodnota  $EFPY$  pro palivo v PWR reaktoru činí 13 868,6  $MWd/tU$  [52]. Míra poškození SiC (displacement damage rate) vyjádřená podílem  $\frac{DPA}{EFPY}$  je pro PWR reaktory rovna 3,1 [44]).

Součinitel tepelné vodivosti neozářeného SiC  $\lambda_{SiC_{nonir}}$  je založen na rovnici vytvořené z naměřených hodnot pro průmyslově vyráběný karbid křemíku udávaných v produktovém katalogu firmy Dow Chemical Company (dříve Rohm and Haas) [45]:

$$\lambda_{SiC_{nonir}} = a \cdot \exp(b \cdot T) + c \cdot \exp(d \cdot T) \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (62.15)$$

Kde  $a = 920$ ,  $b = -8,846 \cdot 10^{-3}$ ,  $c = 349,1$  a  $d = -1,171 \cdot 10^{-3}$

- Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita  $c_{p_{SiC}}$  je založena podobně jako  $\lambda_{SiC_{nonir}}$  na rovnici vytvořené z naměřených hodnot pro průmyslově vyráběný karbid křemíku [46]:

$$c_{p_{SiC}} = a \cdot T^4 + b \cdot T^3 + c \cdot T^2 + d \cdot T + e \quad [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}], \quad (62.16)$$

kde  $a = -1,192 \cdot 10^{-10}$ ,  $b = 7\,306,081 \cdot 10^{-10}$ ,  $c = -1,7189400506 \cdot 10^{-3}$ ,  $d = 2,0273149301612$  a  $e = 251,0727590341625$ . Tato rovnice je platná v intervalu teplot od 200 °C do 1 500 °C.

- Měrná tepelná roztažnost

Měrná tepelná roztažnost SiC je reprezentována modelovou rovnicí [47]:

$$\frac{\Delta L}{L_{SiC}} = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3 \quad [K^{-1}], \quad (62.17)$$

kde pro

$T \leq 1\,273\,K$ :  $a = -1,8276 \cdot 10^{-6}$ ,  $b = 1,78 \cdot 10^{-8}$ ,  $c = -1,5544 \cdot 10^{-11}$ ,  $d = 4,5246 \cdot 10^{-15}$

Pro teploty vyšší než 1 273 K se tepelná roztažnost ustaluje na hodnotě:

$$\frac{\Delta L}{L_{SiC}} = 5 \cdot 10^6 \quad [K^{-1}] \quad (62.18)$$



Stejně jako rovnici 64.9 je nutno rovnici 64.17 přepsat do tvaru:

$$\left( \frac{\Delta L}{L_{n-1}} - \frac{\Delta L}{L_n} \right)_{SiC} = (a + b \cdot T_{n-1} + c \cdot T_{n-1}^2 + d \cdot T_{n-1}^3) - (a + b \cdot T_n + c \cdot T_n^2 + d \cdot T_n^3), \quad (62.19)$$

kde  $T_n$  [K] značí teplotu paliva současného kroku a  $T_{n-1}$  [K] teplotu paliva kroku předešlého.

- Youngův modul pružnosti v tahu

Youngův modul pružnosti v tahu SiC je reprezentován modelovou rovnicí Xu et al. [31]:

$$E_{SiC} = 428,3 \cdot 10^9 - 4 \cdot 10^7 \cdot T \cdot \exp\left(\frac{-962}{T}\right) \quad [Pa] \quad (62.20)$$

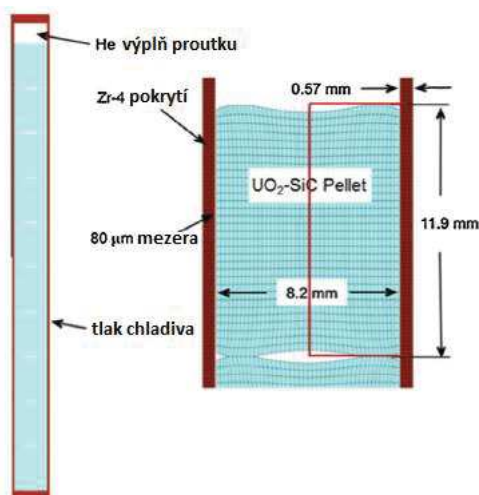
- Poissonova konstanta

Poissonova konstanta SiC je reprezentován modelovou rovnicí Xu et al. [31]:

$$\nu_{SiC} = 0,160937533 - 2,84171929 \cdot 10^{-6} \cdot T \quad [-] \quad (62.21)$$

### 6.3 Vstupní soubor FEMAXI 6 modelující palivový proutek určený ke srovnání výsledků jednotlivých výpočetních programů

Aby se daly jednotlivé výpočetní programy porovnat mezi sebou, bylo nejprve nutno vytvořit prvotní úpravu zdrojového kódu s implementovanými rovnicemi popsány v článku [31]. Dále byl sestaven vstupní soubor modelující palivový proutek, který je zobrazen na Obr. 6-1, a který byl užít k porovnání výsledků mezi jednotlivými výpočetními programy. Tento způsob, kdy je modelovaný tentýž palivový proutek, zaručuje možnost srovnání jednotlivých výpočetních programů.



Obr. 6-1 Palivový proutek modelovaný výpočetními programy [31]

Na Obr. 6-1 lze vidět modelovaný proutek, především počet axiálních segmentů, rozměry pelet, tloušťku pokrytí a velikost palivové mezery. Ostatní geometrické vlastnosti palivového proutku a paliva jsou uvedeny v Tab. 6-1, včetně podmínek definujících jeho provoz. V první části tabulky jsou údaje vyčtené přímo z článku [31], druhou část tvoří údaje dopočtené z hodnot v první části a třetí část tvoří hodnota rychlosti proudění paliva, která je zvolena na základě odborného úsudku. Jedná se o hodnotu mající vliv pouze první 3 hodiny, jelikož následně definováním vnější

teploty pokrytí ztrácí tato hodnota v souladu s literaturou [31] význam. Výkon paliva nejdříve lineárně roste a během 3 hodin dosáhne střední hodnoty poproutkového výkonu 200 W/cm. Následně je tento výkon konstantně udržován po dobu 3,8 let.

Tab. 6-1 Specifikace pelety, palivového proutku a dalších nastavení pro vstupní soubor programu FEMAXI 6 dle informací uvedených v [31]

Veličina	Hodnota
Počet segmentů $n$ [–]	10
Velikost počáteční mezery mezi palivem a pokrytím $l_{mez}$ [ $\mu m$ ]	80
Tloušťka pokrytí $l_c$ [mm]	0.57
Průměr pelety $d_{pel}$ [cm]	0.82
Výška pelety $h_{pel}$ [cm]	1.19
Obohacení paliva [–]	0.04
Teoretická hustota paliva [–]	0.95
Složení plynné výplně	100 % He
Počáteční tlak plynné výplně [MPa]	2
Střední lineární tepelný výkon [W/cm]	200
Tok rychlých neutronů [ $n/m^2s$ ]	$9.5 \times 10^{17}$
Tlak chladiva [MPa]	15.5
Vstupní teplota chladiva $T_c$ [K]	530
Součinitel přestupu tepla z pokrytí do chladiva $\alpha$ [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]	7 500
Poměr délky horního prostoru mezi koncem palivového sloupce a horní uzavěrkou ku délce palivového sloupce $R$ [–]	0.045
Veličiny vypočtené	Hodnota
Vnitřní průměr pokrytí $d_{ci}$ [cm]	0.836
Vnější průměr pokrytí $d_{co}$ [cm]	0.95
Teplota vnějšího povrchu pokrytí $T_{co}$ [K]	619.36
Objem prostoru mezi horním koncem palivového sloupce a horní uzavěrkou palivového proutku $V_{up}$ [ $cm^3$ ]	0.2939
Veličina odborně zvolená	Hodnota
Rychlost proudění chladiva [m/s]	3.04

**Výpočty doplňkových veličin potřebných pro vstupní soubor:**

- Vnitřní průměr pokrytí  $d_{ci}$  [cm]:

$$d_{ci} = d_{pel} + 2 \cdot l_{mez} \quad [cm] \quad (63.1)$$

$$d_{ci} = 0,82 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 80 \cdot 10^{-6} = 8,36 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 0,836 \text{ cm}$$

- Vnější průměr pokrytí  $d_{co}$  [cm]:

$$d_{co} = d_{ci} + 2 \cdot l_c \quad [cm] \quad (63.2)$$

$$d_{co} = 8,36 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,57 \cdot 10^{-3} = 9,5 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 0,95 \text{ cm}$$

- Teplota vnějšího povrchu pokrytí  $T_{co}$  [K]:

$$T_{co} = \frac{P_{lin} \cdot h_{pel}}{\alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{d_{co}}{2} \cdot h_{pel}} + T_c \quad [K] \quad (63.3)$$

$$T_{co} = \frac{200 \cdot 10^2 \cdot 1,19 \cdot 10^{-2}}{7\,500 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{0,95 \cdot 10^{-2}}{2} \cdot 1,19 \cdot 10^{-2}} + 530 = 619,36 \text{ K}$$

- Objem prostoru mezi horním koncem palivového sloupce a horní uzávěrkou palivového proutku  $V_{up}$  [cm<sup>3</sup>]:

$$V_{up} = R \cdot n \cdot h_{pel} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{ci}}{2}\right)^2 \quad [cm^3] \quad (63.3)$$

$$V_{up} = 0,045 \cdot 10 \cdot 1,19 \cdot 10^{-2} \cdot \pi \cdot \left(\frac{8,36 \cdot 10^{-3}}{2}\right)^2 \cdot 293,9 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3 = 0,2939 \text{ cm}^3$$

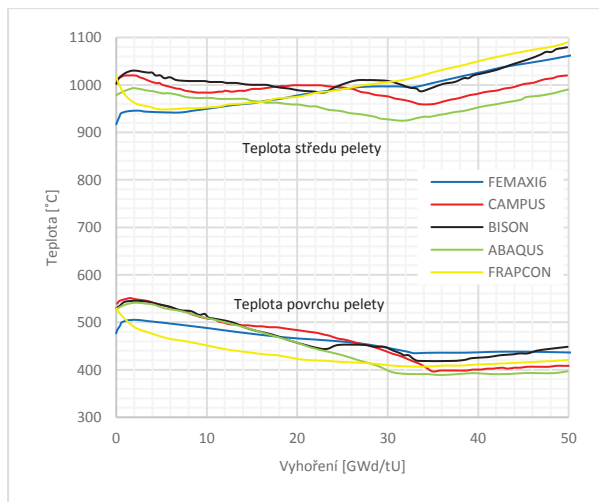
**6.4 Srovnání jednotlivých výpočetních programů**

V rámci výzkumné práce [31] bylo autory nejprve provedeno srovnání vybraných výpočetních programů (CAMPUS, FRAPCON, BISON, ABAQUS). Tato data byla převzata a užita ke srovnání výpočetních programů spolu s upraveným výpočetním programem FEMAXI 6. Prvotní srovnání výpočetních programů je provedeno pro palivový proutek obsahující pelety z čistého UO<sub>2</sub>, jehož specifikace tvaru a provozu je popsána v kapitole 6.3. Srovnání v závislosti na objemovém poměru příměsi SiC upravených programů CAMPUS a FEMAXI 6, umožňující analýzu kompozitního paliva, se nalézá v kapitole 6.5.

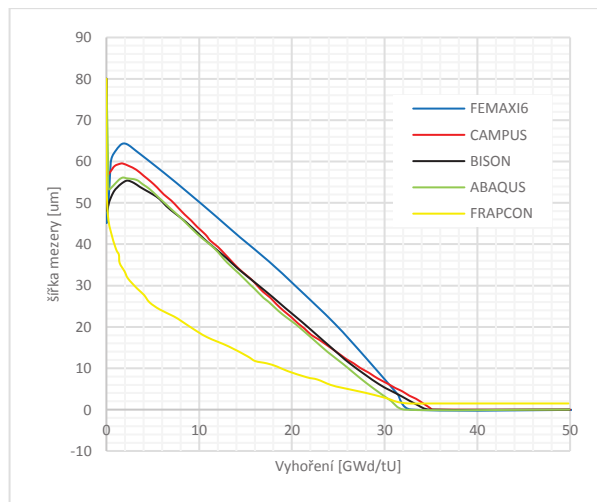
Obr. 6-2 popisuje závislost teplot středu a povrchu pelety v závislosti na vyhoření. Při bližším srovnání křivek teploty středu pelety lze vidět u výsledku programu FEMAXI 6 nízkou počáteční teplotu, nižší téměř o 100 °C oproti ostatním výpočetním programům. V absolutní míře jsou teplotní spády mezi středem a povrchem téměř totožné. V průběhu zvyšující ho se vyhoření postupně dochází k vzrůstu teploty středu pelety a při vyhoření 20 GWd/tU jsou výsledky programu FEMAXI 6 téměř srovnatelné s jednotlivými výpočetními programy. Při dalším

zvyšování vyhoření dosahují výsledky programu FEMAXI 6 téměř středu pásma ohraničeného výsledky ostatních výpočetních programů. Stejného trendu při vysokém stupni vyhoření, s ohledem na porovnání křivek jednotlivých výpočetních programů, dosahuje i teplota povrchu pelety.

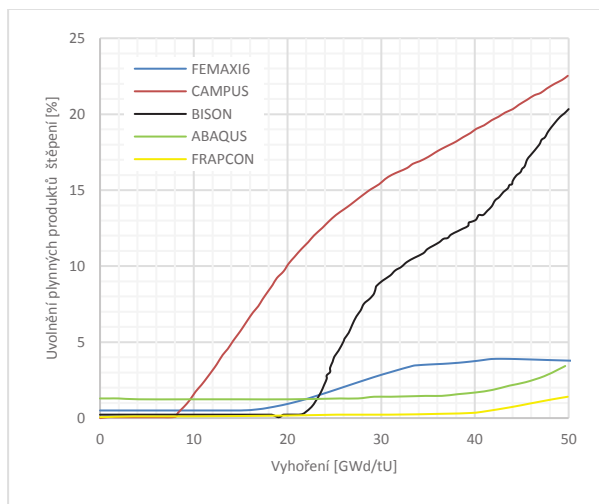
Srovnání šířky mezery mezi palivovým sloupcem a pokrytím lze nalézt na Obr. 6-3. Z výsledků lze vidět, že vyjma výsledku programu FRAPCON kopírují zbylé křivky stejný trend, kde na úplném počátku se velikost mezery rapidně zmenší, následně se postupně zvětšuje do svého lokálního maxima při vyhoření 2 MWd/tU a následně se pozvolna zmenšuje. K uzavření mezery mezi palivem a pokrytím dochází v rozmezí vyhoření od 31 do 35 MWd/tU.



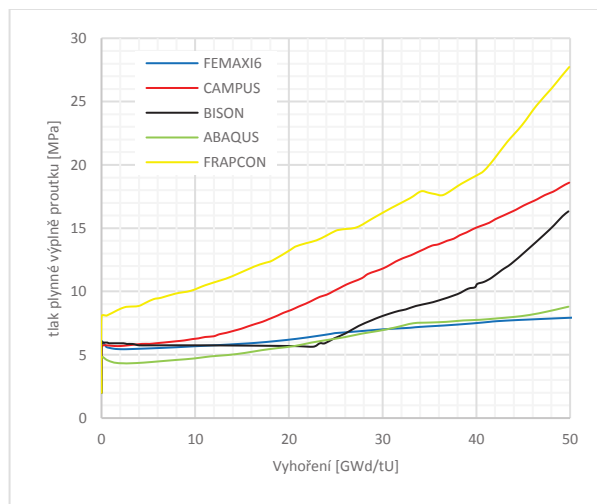
Obr. 6-2 Závislost teploty středu a povrchu pelety na vyhoření



Obr. 6-3 Šířka mezery mezi peletou a pokrytím v závislosti na vyhoření



Obr. 6-4 Uvolnění plynných produktů štěpení v závislosti na vyhoření



Obr. 6-5 Tlak plynné výplně proutku v závislosti na vyhoření

Největší rozdíl mezi výsledky lze pozorovat u Obr. 6-4, popisujícího uvolnění plynných produktů štěpení. Při bližším náhledu lze vidět nejednotnost výsledků i mezi ostatními výpočetními programy, čímž tak vzniká široké pásmo v množství uvolněných plynných produktů štěpení při vysokém stupni vyhoření, a to od 1 % do 21 %. Začátek uvolňování plynných produktů štěpení je též nejednoznačný, v rozmezí od 9 až do téměř 40 GWd/tU. Výsledky uvolňování plynných produktů štěpení generované programem FEMAXI 6 se přibližují výsledkům programu ABAQUS.

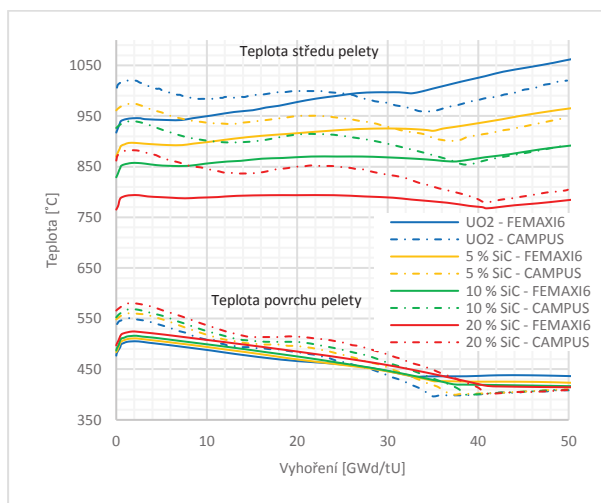
Posledním grafem reprezentujícím srovnání mezi jednotlivými výpočetními programy je Obr. 6-5, představující tlak plynné výplně palivového proutku. Počáteční tlak modelovaný na 2 MPa se na počátku rapidně zvýší na hodnotu v rozmezí 5 až 7 MPa a následně se vzrůstajícím vyhořením nadále roste. V důsledku rozdílného uvolňování plynných produktů štěpení mezi jednotlivými výpočetními programy se liší i konečný tlak plynné výplně při vysokém stupni vyhoření. Výsledky tlaku plynné výplně generované programem FEMAXI 6 se i zde přibližují výsledkům programu ABAQUS.

## 6.5 Srovnání FEMAXI 6 s programem CAMPUS v analýze vlivu obsahu SiC

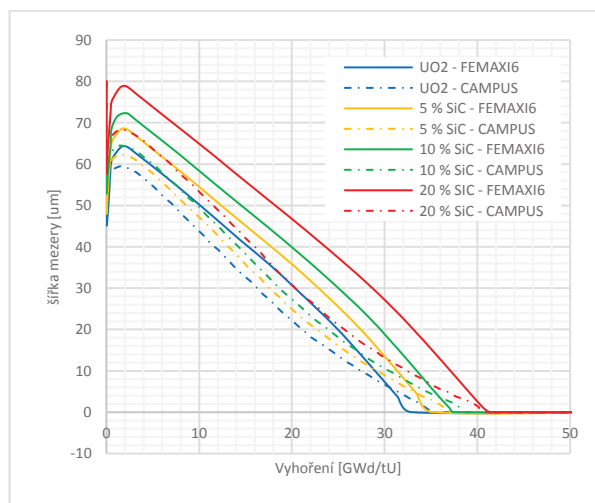
V rámci výzkumné práce [31] byl autory upraven výpočetní program CAMPUS, do kterého byly implementovány rovnice popsané v tomto článku. Než-li bylo přistoupeno k analýze dat možného paliva provozovatelného v JE Dukovany, bylo nutné nejprve provést srovnání výsledků upraveného programu CAMPUS a upraveného programu FEMAXI 6 v závislosti na zvyšujícím se poměru příměsi SiC. Ke generování výsledků byl použit tentýž modelovaný palivový prutek, který je popsán v kap. 6.3 a který byl použit i pro srovnání jednotlivých výpočetních programů mezi sebou (kap. 6.4). Volbou existujících materiálových rovnic, implementovaných chybějících materiálových rovnic i volbou modelů chování jednotlivých parametrů však nebylo dosaženo jednotnosti výsledků. I přesto, že generované výsledky se mírně liší, ve většině případů kopírují trend, a to jak při zvyšujícím se vyhoření, tak i při zvyšujícím se podílu objemu příměsi.

Obr. 6-6 až Obr. 6-9 zobrazují srovnání výsledků programu CAMPUS a FEMAXI 6, kde lze zároveň vidět i závislosti a trendy ve zvyšujícím se množství objemu příměsi SiC. Z Obr. 6-6 je patrné, že s rostoucím podílem SiC klesá teplota středu pelety a naopak teplota povrchu pelety roste. Rozdíly teplot na počátku vyhořívání jsou značné, se vzrůstajícím podílem příměsi rozdíly rostou. Opačný trend lze pozorovat při vysokém stupni vyhoření, kdy se rozdíly naopak zmenšují. K protnutí hodnot dochází u čistého  $\text{UO}_2$  při vyhoření kolem 25 MWd/tU, se vzrůstajícím podílem příměsi se však bod protnutí posunuje do vyšších hodnot vyhoření. Dále si lze povšimnout, že při vzrůstajícím podílu příměsi klesá i v absolutní míře rychlost vzrůstu teploty středu pelety se vzrůstajícím stupněm vyhoření.

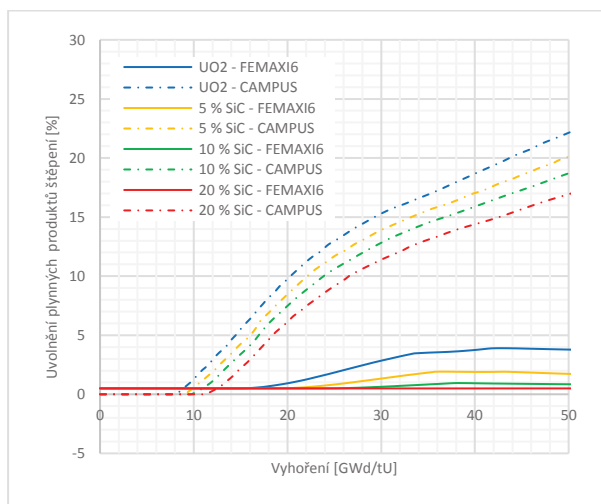
U Obr. 6-7 reprezentujícího velikost šířky mezery mezi palivovým sloupcem a pokrytím lze pozorovat trend pozdějšího uzavírání mezery, nižšího rapidního poklesu šířky mezery na počátku vyhořívání způsobené snižováním měrné tepelné roztažnosti a dále pak většího zvětšení mezery při prvotním vyhoření do 2 MWd/tU. Srovnáním mezi jednotlivými odpovídajícími křivkami programů FEMAXI 6 a CAMPUS lze pozorovat v závislosti na zvyšujícím se podílu příměsi jednak zvětšování rozdílů mezi výsledky, ale zároveň i vyrovnávání hodnoty vyhoření, při kterém dojde k uzavření mezery.



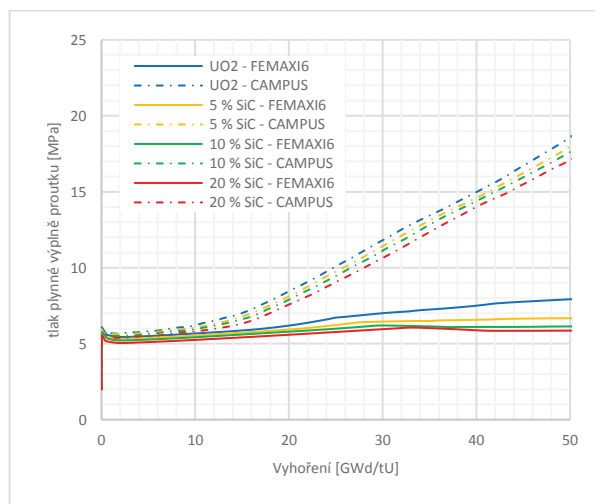
Obr. 6-6 Závislost teplot pelety na objemu příměsi SiC a na vyhoření



Obr. 6-7 Šířka mezery mezi palivem a pokrytím v závislosti na objemu příměsi a vyhoření



Obr. 6-8 Uvolňování plynných produktů štěpení v závislosti na objemu příměsi SiC a vyhoření



Obr. 6-9 Tlak plynné výplně palivového proutku v závislosti na objemu příměsi SiC a vyhoření

Uvolňování plynných produktů štěpení a tlak plynné výplně přibližují Obr. 6-8 a Obr. 6-9. U obou grafů je patrná tendence snižování dané veličiny se vzrůstajícím podílem příměsi, zároveň však rozdíly mezi výsledky jednotlivých výpočetních programů jsou znatelné, u vysokého stupně vyhoření dosahují rozdíly několikanásobné výše.



## 6.6 Vstupní soubor programu FEMAXI 6 s daty pro JE Dukovany

V rámci této bakalářské práce je kromě prvotní úpravy zdrojového kódu programu FEMAXI 6, a následnému srovnání výsledků mezi jednotlivými výpočetními programy na základě modelování totožného palivového proutku, vypracována i druhotná úprava zdrojového kódu FEMAXI 6. Tato druhotná verze obsahující materiálové rovnice vyjadřující reálnější vlastnosti průmyslově dostupných materiálů slouží k analýze možného kompozitního paliva provozovatelného v JE Dukovany. Na základě specifikace paliva Gd-2M byl sestaven vstupní soubor reprezentující geometrické rozměry a parametry provozu paliva v současné době užívaného v JE Dukovany. Bližší specifikace veličin potřebných pro vstupní soubor se nalézají v Tab. 6-2, umístění modelovaného proutku v rámci palivové kazety je pak zobrazeno na Obr. 6-10.

Tab. 6-2 Specifikace pelety, palivového proutku a dalších nastavení paliva Gd-2M [48]

Veličina	Hodnota
Počet segmentů $n_{seg}$ [–]	20
Vnitřní průměr pokrytí [cm]	0.768
Vnější průměr pokrytí [cm]	0.910
Šířka zkosení $y$ [cm]	0.01-0.03
Úhel zkosení $\alpha$ [°]	25
Průměr centrálního otvoru [cm]	0.12
Průměr pelety $d_{pel}$ [cm]	0.757-0.76
Výška pelety [cm]	1.0-1.2
Výška palivového sloupce $l_{pal.sl}$ [cm]	248
Obohacení paliva [–]	0.046
Hustota paliva $\rho_{pal}$ [ $g \cdot cm^{-3}$ ]	10.4-10.7
Složení plynné výplně	100 % He
Počáteční tlak plynné výplně [MPa]	0.7
Vzdálenost od konce palivového sloupce k horní uzávěrce $l_{up}$ [cm]	7.4-8.9
Vzdálenost od konce palivového sloupce k dolní uzávěrce [cm]	0
Vstupní teplota chladiva [K]	540.15
Tlak chladiva [MPa]	12.25
Veličiny vypočtené	Hodnota
Objem prostoru mezi horním koncem palivového sloupce a horní uzávěrkou palivového proutku $V_{up}$ [ $cm^3$ ]	3.428-4.122
Teoretická hustota $th$ [–]	0.9489-0.9763
Hloubka zkosení $h_{zkos}$ [cm]	0.00466-0.013989
Délka axiálního segmentu $l_{seg}$ [cm]	12.4
Rychlost proudění chladiva $v_{kaz}$ [ $m \cdot s^{-1}$ ]	3.2649

**Výpočty doplňkových veličin potřebných pro vstupní soubor:**

- Objem prostoru mezi horním koncem palivového sloupce a horní uzávěrkou palivového proutku  $V_{up}$  [ $cm^3$ ]:

$$V_{up} = l_{up} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{pel}}{2}\right)^2 \quad [cm^3] \quad (66.1)$$

$$V_{up} = 7,4 \cdot 10^{-2} \cdot \pi \cdot \left(\frac{7,68 \cdot 10^{-3}}{2}\right)^2 = 3,428 \cdot 10^{-6} m^3 = 3,428 cm^3$$

$$V_{up} = 8,9 \cdot 10^{-2} \cdot \pi \cdot \left(\frac{7,68 \cdot 10^{-3}}{2}\right)^2 = 4,122 \cdot 10^{-6} m^3 = 4,122 cm^3$$

- Teoretická hustota  $th$  [-]:

100% teoretická hustota  $UO_2$   $\rho_{UO_2} = 10,96 g \cdot cm^{-3}$  [33]

$$th = \frac{\rho_{pal}}{\rho_{UO_2}} \quad [-] \quad (66.2)$$

$$th = \frac{10,4}{10,96} = 0,9489 [-]; \quad th = \frac{10,7}{10,96} = 0,9763 [-]$$

- Hloubka zkosení  $h_{zkos}$  [ $cm$ ]:

$$h_{zkos} = y \cdot tg \ 25 \quad [cm] \quad (66.3)$$

$$h_{zkos} = 0,01 \cdot tg \ 25 = 0,004663 cm; \quad h_{zkos} = 0,3 \cdot tg \ 25 = 0,013989 cm$$

- Délka axiálního segmentu  $l_{seg}$  [ $cm$ ]:

$$l_{seg} = \frac{l_{pal.sl}}{n_{seg}} \quad [cm] \quad (66.4)$$

$$l_{seg} = \frac{l_{pal.sl}}{n_{seg}} = \frac{248}{20} = 12,4 cm$$

- Rychlost proudění chladiva  $v_{kaz}$  [ $m \cdot s^{-1}$ ]

Průtočné průřezy [48]:

- V kazetách  $S_{kaz}$ :  $3,0349 m^2$
- Mezikazetový  $S_{mekaz}$ :  $0,2464 m^2$
- Mezi kazetami a nosným válcem  $S_{mezi}$ :  $0,4466 m^2$

Střední teplota chladiva: 282 °C [48]

$$\rho_{282\text{ }^{\circ}\text{C}} = 755,88 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \text{ [50]}$$

Tlak chladiva I.O.: 12,25 MPa [49]

1) Z hodnot pro blok 1 EDU

Hmotnostní průtok bloku 1 EDU  $Q_m$ : 9 200 kg · s<sup>-1</sup> [48]

Výpočet rychlosti proudění chladiva  $v_{kaz}$  [m · s<sup>-1</sup>] je dán rovnicí:

$$v_{kaz} = \frac{Q_m}{\rho_{282\text{ }^{\circ}\text{C}}} \cdot \frac{1}{S_{kaz} + S_{mezikaz} + S_{mezi}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (66.5)$$

$$v_{kaz} = \frac{9\,200}{755.88} \cdot \frac{1}{3.0349 + 0.2464 + 0.4466} = 3.2649 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

2) Z kalorimetrické rovnice a dat pro blok 1 EDU

Teploty [49]:

- Teplota na vstupu do reaktoru  $T_1$ : 267 °C
- Teplota na výstupu z reaktoru  $T_2$ : 297 °C

Výkon reaktoru [49]:  $P = 1\,444 \text{ MW}$

Entalpie vody při tlaku 12,25 MPa [50]:

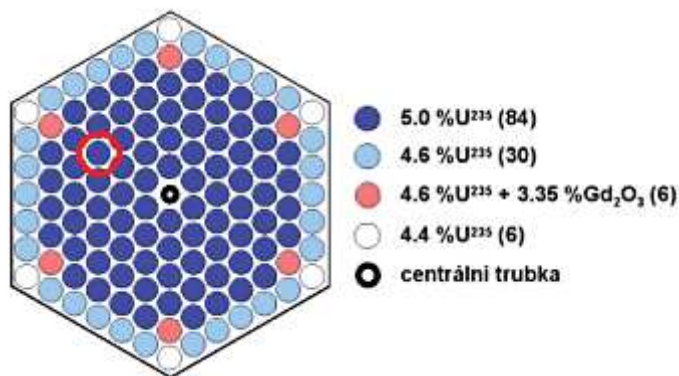
- $i_1 = 1\,168,3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  - (pozn.: při teplotě chladiva  $T_1$ )
- $i_2 = 1\,324,1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  - (pozn.: při teplotě chladiva  $T_2$ )

$$Q_m = \frac{P}{c_p \cdot (T_2 - T_1)} = \frac{P}{i_2 - i_1} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (66.6)$$

$$Q_m = \frac{1\,444 \cdot 10^6}{1\,324.1 - 1\,168.3} = 9\,268.293 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

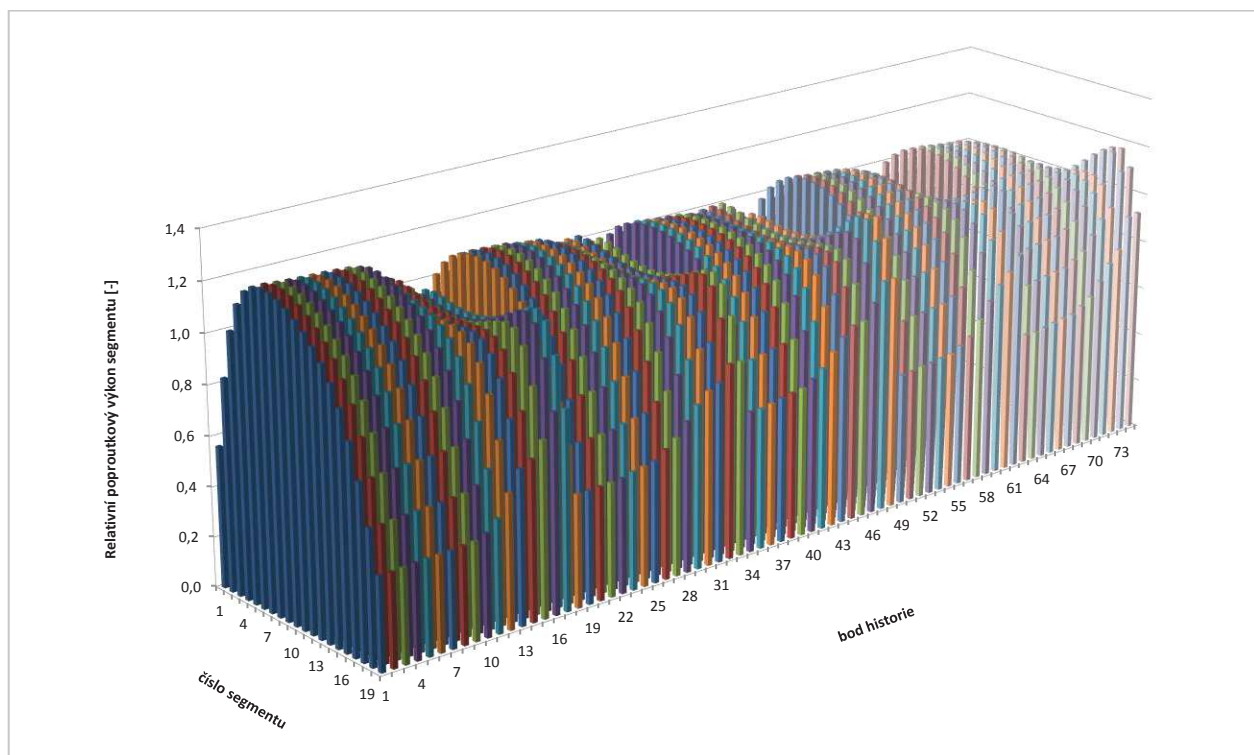
Je-li již znám hmotnostní průtok  $Q_m$ , dosazením do rovnice 66.5 lze dopočítat rychlost proudění chladiva  $v_{kaz}$  [m · s<sup>-1</sup>]:

$$v_{kaz} = \frac{9\,268.293}{755.88} \cdot \frac{1}{3.0349 + 0.2464 + 0.4466} = 3.2891 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$



Obr. 6-10 Uspořádání palivové kazety paliva Gd-2M s vyznačeným modelovaným proutkem [51]

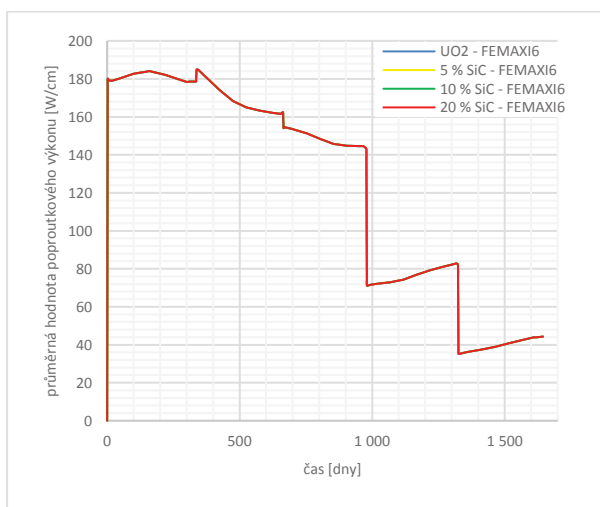
Ke konstrukci vstupního souboru je zapotřebí kromě specifikace geometrických rozměrů definovat i provoz tohoto palivového proutku, především stanovit relativní poproutkové výkony jednotlivých segmentů palivového proutku v časových bodech historie, definující charakter průběhu vyhořívání paliva. Grafické zobrazení zadávaných hodnot lze nalézt na Obr. 6-11, kde číslování segmentů je myšleno od spodního konce palivového proutku. Potřebné hodnoty byly získány z výpočetního programu MOBYDICK a užité v práci [54], které se následně upravily a redukovaly z 42 segmentů na 20 segmentů, přičemž hodnota plochy relativních výkonů segmentů byla zachována.



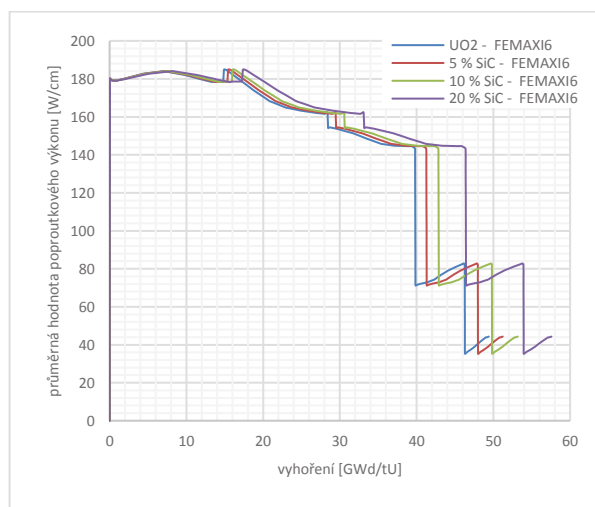
Obr. 6-11 Relativní hodnoty poproutkového výkonu jednotlivých segmentů v průběhu vyhořívání

## 6.7 Analýza možného kompozitního paliva provozovatelného v JE Dukovany

Na základě úprav zdrojového kódu programu FEMAXI 6 a sestavením vstupního souboru obsahujícího relativní poproutkové výkony jednotlivých segmentů v průběhu provozu paliva v reaktoru, získané z výpočetního programu MOBYDICK, lze provést analýzu možného kompozitního paliva s příměsí SiC provozovatelného v JE Dukovany. Analýza byla provedena pro segment číslo 10, který se nachází téměř uprostřed palivového proutku. Jelikož se relativní poproutkové výkony jednotlivých segmentů liší, budou i průběhy pro ostatní segmenty odlišné. Vývoj hodnoty průměrného poproutkového výkonu v čase je zobrazen na Obr. 6-12. Zde lze zřetelně vidět hranice mezi jednotlivými roky pětileté palivové kampaně a postupné snižování tepelného výkonu kazety, způsobené především přemístěním kazety v rámci aktivní zóny a zvyšujícím se stupněm vyhoření paliva.



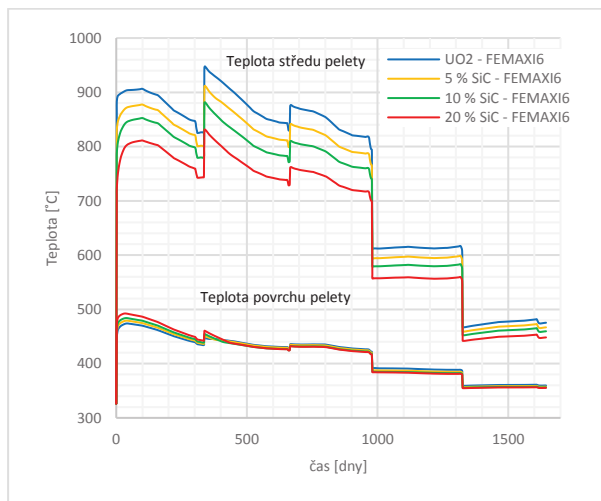
Obr. 6-12 Vývoj průměrné hodnoty poproutkového výkonu palivového proutku v čase



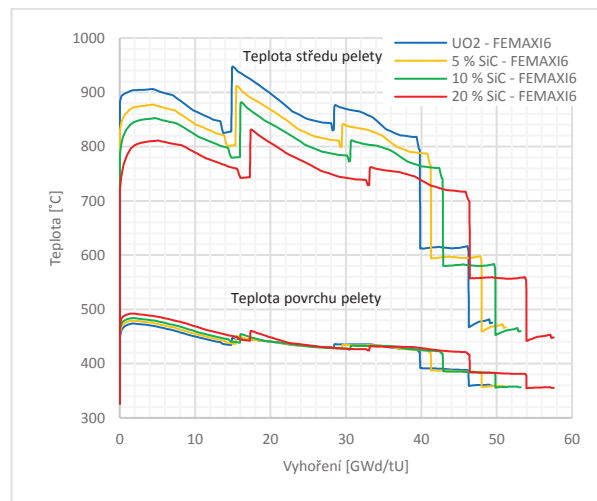
Obr. 6-13 Vývoj průměrné hodnoty poproutkového výkonu palivového proutku v závislosti na procentním podílu příměsi SiC a vyhoření

Vývoj průměrné hodnoty poproutkového výkonu v závislosti na vyhoření a objemovém procentním zastoupením SiC lze vidět na Obr. 6-13. Z tohoto grafu je patrné zvyšující se vyhoření paliva s rostoucím podílem příměsi SiC, jelikož její přítomnost zmenšuje množství štěpitelného materiálu obsaženého v peletě. Pro zachování stejného tepelného výkonu tudíž musí zákonitě růst vyhoření paliva.

Obr. 6-14 a Obr. 6-15 zobrazují závislosti teplot středu a povrchu pelety v závislosti na podílu objemu příměsi SiC. Z grafů teplot je patrná tendence snižování teploty středu pelety se zvyšujícím se podílem příměsi SiC. Snižování nejvyšší dosahované teploty středu pelety během počátku druhého roku pětileté kampaně je pro 20% podíl SiC o 12,27 %, pro 10% podíl SiC o 6,98 % a pro 5% podíl SiC o 3,77 % oproti průběhu teploty středu pelety paliva z čistého UO<sub>2</sub>. Teplota povrchu pelety s růstem podílu příměsi mírně roste, avšak znatelnějších rozdílů dosahuje pouze během prvního roku provozu (u 20% podílu SiC se jedná o zvýšení teploty povrchu pelety okolo 20 °C), v dalších letech se rozdíly zmenšují a téměř splývají. Pro nejvyšší dosahovanou teplotu povrchu paliva (okolo 50. dne prvního roku kampaně) lze pozorovat vzrůst teploty povrchu pelety o 1,1 % pro palivo s 5% příměsí SiC, o 2,09 % pro palivo s 10% příměsí SiC a o 3,85 % pro palivo s 20% příměsí SiC oproti palivu z čistého UO<sub>2</sub>.

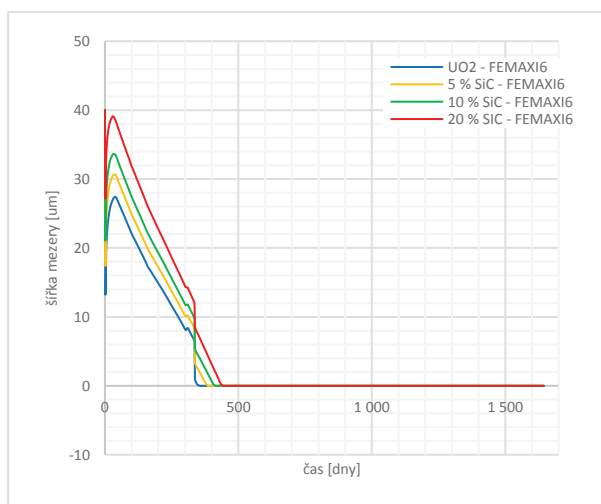


Obr. 6-14 Závislost teplot pelety na objemu příměsi SiC a čase

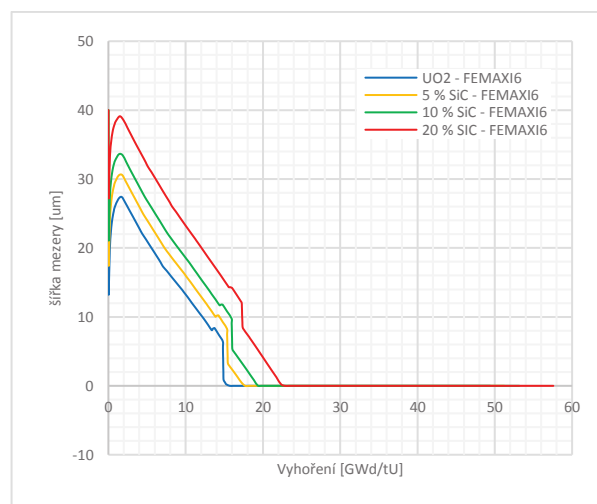


Obr. 6-15 Závislost teplot pelety na objemu příměsi SiC a na vyhoření

Dalším z analyzovaných údajů je šířka mezery mezi palivem a pokrytím v závislosti na objemu příměsi představující Obr. 6-16 a Obr. 6-17. Se zvyšujícím se podílem příměsi lze sledovat trend snižování velikosti počátečního rapidního zmenšení šířky mezery způsobené tepelnou roztažností. Měrná tepelná roztažnost je veličina závislá na teplotě, proto při zvyšování součinitele tepelné vodivosti klesá provozní teplota pelety a tím dochází k zmenšování expanze při najíždění reaktoru. Dále lze pozorovat zvětšování mezery způsobené zhušťováním pelety v prvních dnech provozu do doby, než převládne napuchání pelety, a nakonec postupné prodlužování doby a hodnoty vyhoření, kdy dojde k uzavření mezery mezi palivem a pokrytím. Jelikož výpočetní program FEMAXI 6 zahrnuje relativní tepelný poproutkový výkon pelety do výpočtů vývoje šířky mezery, lze sledovat částečný rychlý pokles šířky mezery mezi palivem a pokrytím na začátku druhého roku kampaně. V tuto dobu došlo ke skokovému zvýšení hodnoty tepelného výkonu pelety, vzrůstu její teploty, a tím i rapidnímu zvětšení palivové pelety a zmenšení šířky sledované mezery. Se zvyšujícím se podílem příměsi i tento jev klesá, především způsobený snížením teploty palivové pelety.



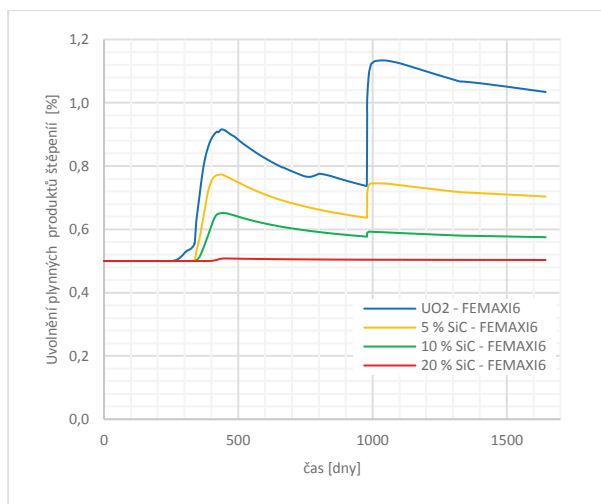
Obr. 6-16 Šířka mezery mezi palivem a pokrytím v závislosti na objemu příměsi a čase



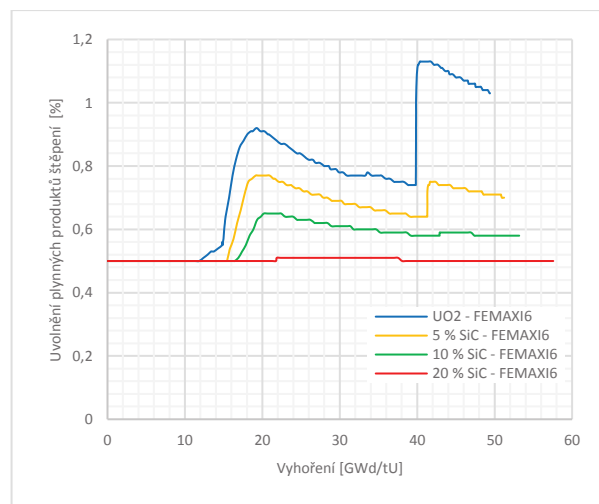
Obr. 6-17 Šířka mezery mezi palivem a pokrytím v závislosti na objemu příměsi a vyhoření



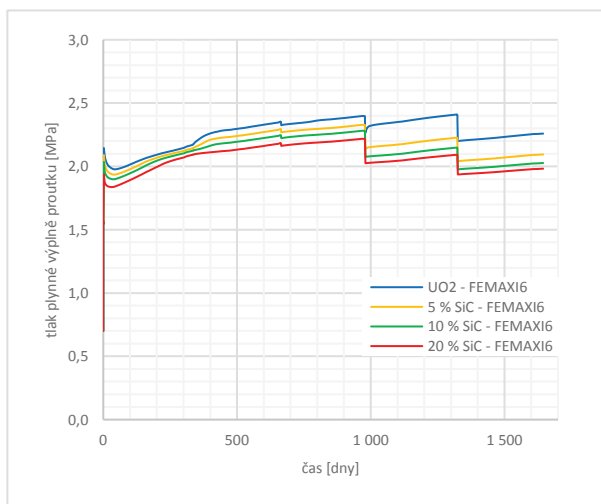
Uvolňování plynných produktů štěpení z paliva je zobrazeno na Obr.6-18 a Obr. 6-19. Množství uvolňovaných plynných produktů štěpení z RIM oblasti dle modelu zvoleného ve vstupním souboru se řídí především hodnotou lokálního vyhoření paliva, avšak je též silně závislé na výpočtu difuzní konstanty. Při v této práci zvolené konfiguraci dosahuje nejvyšší množství uvolněných plynných produktů štěpení hodnoty 1,13 % u paliva z čistého  $\text{UO}_2$ . Následkem snižování teploty paliva zvyšováním podílu SiC se zmírňuje i uvolňování plynných produktů štěpení, pro 20% příměs SiC dosahuje množství uvolněných plynných produktů štěpení téměř konstantní hodnoty 0,5 %. Zvýšení hodnoty uvolňování plynných produktů štěpení lze vidět na počátku 2. a 3. roku provozu, v dalším průběhu daného roku má tato hodnota klesající charakter.



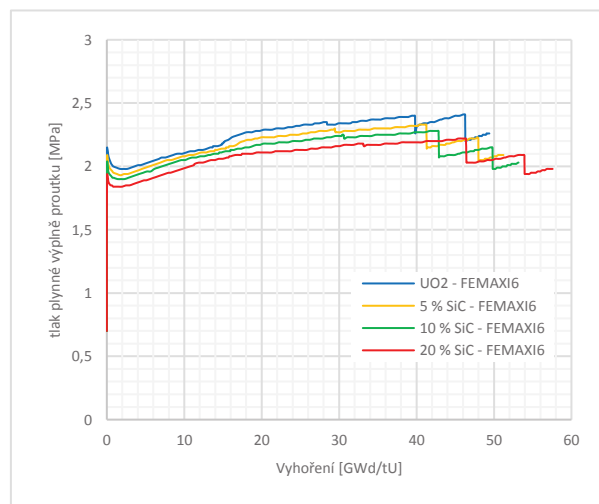
Obr. 6-18 Uvolňování plynných produktů štěpení v závislosti na objemu příměsi SiC a čase



Obr. 6-19 Uvolňování plynných produktů štěpení v závislosti na objemu příměsi SiC a vyhoření



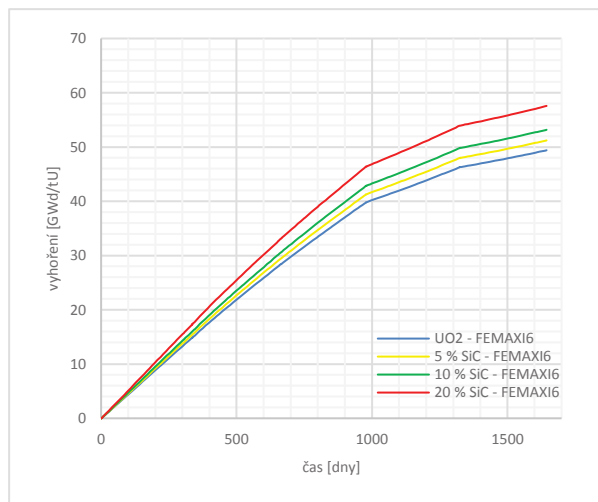
Obr. 6-20 Tlak plynné výplně palivového proutku v závislosti na objemu příměsi SiC a čase



Obr. 6-21 Tlak plynné výplně palivového proutku v závislosti na objemu příměsi SiC a vyhoření

Jedním z posledních analyzovaných údajů je tlak plynné výplně palivového proutku vyobrazený na Obr.6-20 a Obr. 6-21. S rostoucím podílem příměsi se zmenšuje tepelná roztažnost palivového sloupce, klesá teplota pelet a snižuje se uvolňování plynných produktů štěpení. Všechny tyto faktory přispívají ke snižování tlaku plynné výplně, především snižováním hodnoty uvolněných plynných produktů štěpení dochází na konci pětileté kampaně ke zvyšování rozdílů

v tlacích oproti proutku z čistého  $\text{UO}_2$ . Tento efekt je nejvýraznější u paliva s 20 % SiC, kde tlak na konci kampaně dosahuje místo hodnoty 2,1 MPa (pro  $\text{UO}_2$ ) hodnoty 1,98 MPa. Dále lze pozorovat v prvotních chvílích rapidní růst tlaku z původních 0,7 MPa na hodnotu okolo 2 MPa způsobený zvýšením teploty plynné výplně proutku na provozní stav a kopírování trendů poproutkových výkonů.



Obr. 6-22 Závislost vyhoření paliva na čase a podílu příměsi SiC

Poslední sledovanou hodnotou je závislost vyhoření paliva na Obr. 6-22. Zde lze pozorovat vzrůst hodnoty vyhoření paliva s rostoucím podílem SiC. V průběhu prvních třech let provozu dosahuje palivo jen lehkého zmírňování růstu vyhoření, rapidnější pokles lze sledovat až na začátcích čtvrtého a pátého roku provozu. Konečná hodnota vyhoření postupně vzrůstá, pro 5% podíl SiC dosahuje zvýšení o 3,68 %, pro 10% podíl SiC dosahuje zvýšení o 7,63 % a pro 20% podíl SiC dosahuje zvýšení hodnoty vyhoření o 16,54 % oproti vyhoření paliva z čistého  $\text{UO}_2$ .

Tab. 6-1 reprezentuje přehledné srovnání sledovaných údajů na konci pětileté kampaně. Kromě samotných hodnot jsou zde i srovnání vyjádřené v procentech, kde jednotlivé procentní hodnoty se vztahují k hodnotám paliva z čistého  $\text{UO}_2$ , čímž lze tak číselně vyjádřit zvýšení nebo pokles dané veličiny.

Tab. 6-1 Hodnoty vybraných údajů pro jednotlivá analyzovaná kompozitní paliva na konci pětileté kampaně

	UO2		5 % SiC		10 % SiC		20 % SiC	
Vyhoření [MWd/tU]	49,40	100 %	51,22	103,68 %	53,17	107,63 %	56,22	116,54 %
Teplota středu pelety [°C]	475,34	100 %	466,80	98,20 %	459,57	96,68 %	448,24	94,30 %
Teplota povrchu pelety [°C]	359,64	100 %	357,52	99,41 %	356,11	99,02 %	355,20	98,76 %
Doba uzavření mezery mezi palivovým sloupcem a pokrytím [dny]	355,30	100 %	386,07	108,66 %	416,81	117,31 %	445,54	125,40 %
Uvolňování plynných produktů štěpení [%]	1,03	100 %	0,70	68,06 %	0,58	55,63 %	0,50	48,67 %
Tlak plynné výplně proutku [MPa]	2,26	100 %	2,09	92,71 %	2,03	89,70 %	1,98	87,73 %

## 7 ZÁVĚR

Jelikož jaderné havárie způsobují těžké škody a ovlivňují rozsáhlou oblast, je nutné jim pomocí aktivních a pasivních způsobů v maximální možné míře zabránit. Zvyšování tepelné vodivosti paliva je slibnou metodou zlepšující přirozenou odolnost paliv užitých v jaderných reaktorech, jelikož chování paliva a negativní vlastnosti jsou spjaté s teplotou pelety. Pro zvyšování této vodivosti lze využít kompozitních paliv skládajících se z oxidu uraničitého a přídavného materiálu s vysokou hodnotou součinitele tepelné vodivosti.

U všech zkoumaných druhů paliv lze sledovat tendenci nárůstu tepelné vodivosti se zvyšujícím se podílem příměsi. Krom samotného procentuálního zastoupení má na tepelnou vodivost vliv i velikost zrn, chemické reakce probíhající mezi jednotlivými materiály a též i výběr samotné slinovací metody, z nichž nejperspektivněji se jeví metoda SPS (Spark Plasma Sintering).

Porovnáním jednotlivých způsobů, jejich procentuálnímu příspěvku k tepelné vodivosti a dopady vzájemných chemických reakcí se jako nejvýhodnější kompozitní palivo jeví kombinace oxidu uraničitého s částčkami diamantu. Avšak jelikož samotná energetika není limitována pouze technickými možnostmi a fyzikálními zákony, ale především ekonomičností provozu, jeví se jako nejlepším přídavným materiálem oxid berylnatý BeO. V porovnání s cenou syntetického diamantu je cena BeO téměř 8x nižší a přitom dosahuje 91,5 % hodnoty tepelné vodivosti paliva s příměsí diamantu (při teplotě 500 °C a téměř shodným objemem příměsi a teoretickou hustotou, viz. Obr. 4-8). Jedinou nevýhodou je toxicita oxidu berylnatého a s ním spojené náklady na bezpečnost výroby, avšak s touto problematikou se setkáváme i ve fázi obohacování uranu, neboť hexafluorid uranu UF<sub>6</sub> je též toxický.

Praktickým výstupem této bakalářské práce je modifikovaný výpočetní program pro analýzu chování jaderného palivového proutku FEMAXI 6, kde zásah do jeho zdrojového kódu umožňuje výzkum chování a vlastností kompozitního paliva s příměsí karbidu křemíku SiC. Zdrojový kód je upraven tak, aby se daly snadno implementovat materiálové vlastnosti další příměsi pod jednotnou volbou, a tím je umožněno rychlé a snadné rozšíření schopností analýzy programu FEMAXI 6 v oblasti dalších druhů kompozitních paliv.

Upravený výpočetní program FEMAXI 6 byl použit k analýze možného kompozitního paliva UO<sub>2</sub> s příměsí SiC pro JE Dukovany. Analýza byla provedena pro segment číslo 10, nalézající se téměř ve středu palivového proutku. O samotné analýze pojednává kapitola 6.7. Z rozboru bylo prokázáno, že užitím kompozitního paliva s příměsí mající vyšší tepelnou vodivost klesá teplota středu pelety. Pro nejvyšší dosaženou teplotu středu pelety v průběhu vyhořívání (během počátku druhého roku pětileté kampaně) dosahuje teplota středu pelety snížení o 12,27 % u 20% podílu SiC, o 6,98 % u 10% podílu SiC a o 3,77 % u 5% podílu SiC oproti palivu z čistého UO<sub>2</sub>.

Pro nejvyšší dosahovanou teplotu povrchu paliva (okolo 50. dne prvního roku kampaně) lze pozorovat vzrůst teploty povrchu pelety o 1,1 % u paliva s 5% příměsí SiC, o 2,09 % u paliva s 10% příměsí SiC a o 3,85 % u paliva s 20% příměsí SiC oproti palivu z čistého UO<sub>2</sub>.

Následkem přidání příměsi do matrice pelety dochází ke zmenšování objemu štěpitelného materiálu a tím dochází ke zvyšování vyhoření paliva. Konečná hodnota vyhoření postupně vzrůstá, pro 5% podíl SiC dosahuje zvýšení o 3,68 %, pro 10% podíl SiC dosahuje zvýšení o 7,63 % a pro 20% podíl SiC dosahuje zvýšení hodnoty vyhoření o 16,54 % oproti vyhoření paliva z čistého UO<sub>2</sub>.

Kompozitní pelety mají díky nižší teplotě paliva prokazatelně menší tepelnou roztažnost a napuchání, čímž dochází k menšímu počátečnímu rapidnímu zvětšení objemu pelety a pozdějšímu uzavírání mezery mezi pokrytím a palivem.

S teplotou paliva, lokálním vyhořením a hodnotou difuzní konstanty je spjata i uvolňování plynných produktů štěpení. Z analýzy vyplývá, že zvyšující podíl příměsi SiC má pozitivní vliv na snižování uvolněných plynných produktů štěpení, a tím tak i na hodnotu tlaku plynné výplně palivového proutku.

Vývoji a výzkumu kompozitních paliv je třeba se věnovat i nadále, především výzkumu zaměřeného na chemické reakce mezi příměsemi a oxidem uranitým, chováním paliva v pracovních podmínkách pelet a na jejich vlastnosti při ozáření.

V neposlední řadě je nutné sledovat i vývoj v oblasti metod výroby materiálů vhodných k zakomponování do matrice  $\text{UO}_2$ , které mohou přinést zlevnění výrobního procesu a přehodnocení výběru nejvhodnějšího materiálu.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Těžba uranu a následky. *Temelín.cz: Atomová energetika v reálném světě* [online]. [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: [http://temelin.cz/index.php?option=com\\_content&view=article&id=146&Itemid=108](http://temelin.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=146&Itemid=108)
- [2] ŠKORPÍK, Jiří. Jaderná energetika, *Transformační technologie*, 2006-12, [date od last update 2012-11]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/jaderna-energetika.html>
- [3] The Nuclear Fuel Cycle. *U.S. Energy Information Administration* [online]. [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: [http://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=nuclear\\_fuel\\_cycle](http://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=nuclear_fuel_cycle)
- [4] The nuclear fuel cycle. *IAEA: International Atomic Energy Agency* [online prezentace]. Rakousko, 2011 [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/sites/default/files/nfc0811.pdf>
- [5] *BULLETIN*. Praha: České jaderné fórum, 2016, (1). ISSN 1213-4554
- [6] Nuclear fuel cycle. *Rosatom* [online]. [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: <http://www.rosatom.ru/en/rosatom-group/nuclear-fuel-cycle/>
- [7] AUTERSKÁ, PH.D., Mgr. Dagmar. *CYKLUS JADERNÉHO PALIVA* [online prezentace]. , 20 [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: [http://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/17\\_Fyzika\\_45-47/45\\_IUT/087\\_Energie-CYKLUS-JADERNEHO-PALIVA---Auterska---P0.pdf](http://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/17_Fyzika_45-47/45_IUT/087_Energie-CYKLUS-JADERNEHO-PALIVA---Auterska---P0.pdf)
- [8] Laser Technology Follows in Lawrence's Footsteps: Precisely tuned lasers light the way to advances in energy, medicine and astronomy. *Lawrence Livermore National Laboratory* [online]. [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: <https://str.llnl.gov/str/Hargrove.html>
- [9] MATOUŠEK, Antonín. *Elektrárny I*. Brno: Vysoké učení technické, 1984
- [10] Obohacování jaderného paliva. Fyzmatik.píše[online]. 2009-01-28, [cit. 2016-10-31]. Dostupné z: <http://fyzmatik.pise.cz/96528-obohacovani-jaderneho-paliva.html>
- [11] S. ULMER-SCHOLLE, Dana. Uranium Enrichment. The New Mexico Bureau of Geology & Mineral Resources [online]. 2009, [cit. 2016-10-31]. Dostupné z: <http://geoinfo.nmt.edu/resources/uranium/enrichment.html>
- [12] Nuclear Fuel Fabrication. *World nuclear association* [online]. 2016 [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/fuel-fabrication.aspx>
- [13] BEČVÁŘ, Josef a kolektiv. *Jaderné elektrárny*. Vyd. 1. Praha/Bratislava: SNTL/Alfa, 1978, 636s
- [14] RAČEK, Jiří. *Jaderná zařízení*. Vyd. 2. Brno: Novpress, 2013, 251 s. ISBN 978-80-214-4745-5
- [15] *Jadrová energia a energetika*. Simopt, s.r.o., 2013. ISBN 978-80-87851-06-7
- [16] MEZISKLAD VYHOŘELÉHO JADERNÉHO PALIVA. *Skupina ČEZ* [online]. 1999 [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/mezisklad.html>

- [17] MEZISKLADY. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: [https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/mezisklady\\_4.html](https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/mezisklady_4.html)
- [18] GUERIN, Yannick, Daniel PARRAT a Jean NOIROT. *NUCLEAR FUELS for Light Water Reactors and Fast Reactors*. France, 2012
- [19] KRTIČKA, Milan. Využití jaderných technologií [online prezentace]. Praha : MFF UK [cit. 2016-12-19]. Dostupný z WWW: [www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/krticka/lectures/reaktors.ppt](http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/krticka/lectures/reaktors.ppt)
- [20] ULLMANN, Vojtěch. Jaderná a radiační fyzika [online]. [cit. 2016-12-19]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika3.htm>
- [21] HEŘMANSKÝ, Bedřich. *Termomechanika jaderných reaktorů: vysokoškolská učebnice pro vysoké školy technické, studijní obor 39-39-8 Jaderné inženýrství*. Praha: Academia, 1986
- [22] GOTCU-FREIS, Petronela. *High temperature thermodynamic studies on the transuranium oxides and their solid solutions: fabrication, characterization and properties*. Amsterdam, The Netherlands: IOS Press, c2011. Refractory materials, vol. 5. ISBN 16-075-0779-X.
- [23] KIM, Dong-Joo, Jae Ho YANG, Keon Sik KIM a Yang-Hyun KOO. UO<sub>2</sub>–UN composites with enhanced uranium density and thermal conductivity. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 2015, , 509-515 [cit. 2017-01-03]. ISSN 0022-3115. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311515300647>
- [24] Glen A. SLACK a S. B. AUSTERMAN. Thermal Conductivity of BeO Single Crystals. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 2003 [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1659844>
- [25] ALPER, Allen M., ed. *High temperature oxides: fabrication, characterization and properties*. New York: Academic Press, 1970. Refractory materials, vol. 5. ISBN 01-205-3303-0.
- [26] S.K. KIM, W.I. KO, H.D. KIM, Shripad T. REVANKAR, W. ZHOU, Daeseong JO. Cost–benefit analysis of BeO–UO<sub>2</sub> nuclear fuel. *Progress in Nuclear Energy* [online]. 2010, (8), 813-821 [cit. 2017-01-03]. ISSN 0149-1970. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0149197010001101>
- [27] LIU, R., W. ZHOU, P. SHEN, A. PRUDIL a P. K. CHAN. Fully coupled multiphysics modeling of enhanced thermal conductivity UO<sub>2</sub>–BeO fuel performance in a light water reactor. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2015, , 511-523 [cit. 2017-01-03]. ISSN 0029-5493. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549315004859>
- [28] YEO, Sunghwan, Ronald BANEY, Ghatu SUBHASH a James TULENKO. The influence of SiC particle size and volume fraction on the thermal conductivity of spark plasma sintered UO<sub>2</sub>–SiC composites. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 2013, , 245-252 [cit. 2017-01-03]. ISSN 0022-3115. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311513010787>
- [29] BENITO, Román-Manso, Yoan CHEVILLOTTE, M. Isabel OSENDI, Manuel BELMONTE a Pilar MIRANZO. Thermal conductivity of silicon carbide composites with highly oriented graphene nanoplatelets. *Journal of the European Ceramic Society* [online].



- 2016, , 3987-3993 [cit. 2017-01-03]. ISSN 0955-2219. Dostupné z:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221916303168>
- [30] YEO, S., E. MCKENNA, R. BANEY, G. SUBHASH a J. TULENKO. Enhanced thermal conductivity of uranium dioxide–silicon carbide composite fuel pellets prepared by Spark Plasma Sintering (SPS). *Journal of Nuclear Materials* [online]. 2013, , 66-73 [cit. 2017-01-03]. ISSN 0022-3115. Dostupné z:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311512004928>
- [31] LIU, Rong, Wenzhong ZHOU, Andrew PRUDIL a Paul K. CHAN. Multiphysics modeling of UO<sub>2</sub>-SiC composite fuel performance with enhanced thermal and mechanical properties. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2016, , 86-100 [cit. 2017-01-03]. ISSN 1359-4311. Dostupné z:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116310870>
- [32] CHEN, Zhichao, Ghatu SUBHASH a James S. TULENKO. Spark plasma sintering of diamond-reinforced uranium dioxide composite fuel pellets. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2015, , 52-59 [cit. 2017-01-03]. ISSN 0029-5493. Dostupné z:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549315003957>
- [33] SUZUKI, Motoe a Hiroaki SAITOU. *Light Water Reactor Fuel Analysis Code FEMAXI-6: Detailed Structure and User's Manual*. Japan Atomic Energy Agency, 2005
- [34] Spalovače nukleárního odpadu. *E15: VTM* [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z:  
<http://vtm.e15.cz/aktuality/spalovace-nuklearniho-odpadu>
- [35] Yellow Cake. *RAM PAGES: A CONNECTED LEARNING COMMUNITY FOR VCU* [online]. 2016 [cit. 2017-01-04]. Dostupné z:  
<https://rampages.us/chem110spring2016ss/2016/05/02/yellow-cake/>
- [36] Diffusion separation process. *European nuclear society: largest nuclear society for science and industry* [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z:  
<https://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/d/diffusionseparating.htm>
- [37] Gas centrifuge process. *European nuclear society: largest nuclear society for science and industry* [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z:  
<https://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/g/gascentrifuge.htm>
- [38] FUEL PELLETS. *INNOVACERA: technical ceramic solution* [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <https://www.innovacera.com/tag/fuel-pellets>
- [39] Fotogalerie: Výměna paliva na druhém bloku Jaderné elektrárny Dukovany. *ATOM INFO: Aktuálně o jádru* [online]. 2014 [cit. 2017-01-04]. Dostupné z:  
<http://atominfo.cz/2014/04/fotogalerie-vymena-paliva-na-druhem-bloku-jaderne-elektrarny-dukovany/>
- [40] Nuclear Cycle. *New Nuclear Power: in the United States* [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <https://newnuclearenergy.wordpress.com/nuclear-cycle-2/>
- [41] *Svět energie: Vzdělávací portál ČEZ* [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z:  
<http://www.svetenergie.cz/cz/fotobanka?sort=dateAsc&polozka=72>
- [42] Co je hlubinné úložiště. *SÚRAO: Správa úložišť radioaktivních odpadů* [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://www.surao.cz/cze/Uloziste-radioaktivnich-odpadu/Budouci-hlubinne-uloziste/Co-je-hlubinne-uloziste>
- [43] Typy jaderného paliva. *ATOM INFO: Aktuálně o jádru* [online]. 2016 [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2016/06/typy-jaderneho-paliva>

- [44] HEINISCH, H.L., L.R. GREENWOOD, W.J. WEBER a R.E. WILLIFORD. Displacement damage in silicon carbide irradiated in fission reactors. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 2004, 175-181 [cit. 2017-05-05]. ISSN 0022-3115. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311504000820>
- [45] Rohm and Haas CVD Silicone Carbide Properties. *Dow* [online]. 2000 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: [http://www.dow.com/assets/attachments/business/gt/advanced\\_ceramics/cvd\\_silicon\\_carbide/tds/cvd\\_silicon\\_carbide.pdf](http://www.dow.com/assets/attachments/business/gt/advanced_ceramics/cvd_silicon_carbide/tds/cvd_silicon_carbide.pdf)
- [46] NIST: National Institute of Standards and Technology [online]. [cit. 2015-06]. Dostupné z: <http://www.ceramics.nist.gov/srd/summary/scdscs.htm>
- [47] SNEAD, Lance L., Takashi NOZAWA, Yutai KATOH, Thak-Sang BYUN, Sosuke KONDO a David A. PETTI. Handbook of SiC properties for fuel performance modeling. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 2007, 329-377 [cit. 2017-05-06]. ISSN 0022-3115. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311507007623>
- [48] Konzultace s Ing. Jiřím Geržou, pracovníkem Reaktorové fyziky EDU dne 10. dubna 2017
- [49] *Sborník přednášek pro Letní univerzitu 2016*. Jaderná elektrárna Dukovany, 2016
- [50] HOLMREN, Magnus. *X Steam Tables* [online]. [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: [http://c2109116.myzen.co.uk/wp-content/uploads/2013/03/Steam\\_Tables.xls](http://c2109116.myzen.co.uk/wp-content/uploads/2013/03/Steam_Tables.xls)
- [51] Zkušenosti s palivem s vyhořívajícími absorbátory na JE Dukovany: Vývoj palivového cyklu. *Český svaz vědeckotechnických společností: Česká nukleární společnost* [online]. [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <http://www.csvts.cz/cns/news06/060223b.htm>
- [52] Konzultace s Ing. Štěpánem Forelem, vedoucím této BP dne 10. března 2017
- [53] PRIEUR, D., R. C. BELIN, D. MANARA, et al. Linear thermal expansion, thermal diffusivity and melting temperature of Am-MOX and Np-MOX. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2015, 326-331 [cit. 2017-05-13]. ISSN 0925-8388. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838815007318>
- [54] MIČIAN, Peter. *Inovace jaderného paliva* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/60413>